

北海道における在来軸組構法住宅の耐雪性能に関する研究 — 小屋梁および垂木の損傷リスクについて —

Study on structural performance for snow load of wood-frame houses in Hokkaido — Damage risk of structural members by snow load —

千葉 隆弘* 堤 拓哉** 高橋 徹*** 苫米地 司†

Takahiro Chiba, Takuya Tsutsumi,
Toru Takahashi and Tsukasa Tomabechi

Abstract

This study aims to clarify the structural performance for snow load of wood-frame houses built in Hokkaido. Properties of girder and rafter influencing the structural performance were extracted from 98 drawings of wood-frame houses. We examined structural models for calculation of snow depth that these members are broken, then calculated the damage depth based on Monte Carlo simulation. In addition, fragility curves described by relationship between roof snow depth and damage probability were produced.

As the results, probability distribution of fragility curves could be described as log-normal distribution. Based on the curves, damage risk of the girder was 5% for 1.0 m depth of roof snow, and this means that it had enough structural performance for snow load. On the other hand, damage risk of rafter was higher than girder. In particular, the damage risk involving with snow cornice on eaves was high, and was 35% for 1.0 m depth of roof snow. From these results, in order to maintain wood-frame houses for a long period, we pointed out the necessity of maintenance such as reinforcement of eaves and snow cornice clearance in winter.

1. はじめに

2012年の冬期に北海道の岩見沢市とその周辺で豪雪となった。岩見沢測候所で観測された年最大積雪深は208cmに達し、過去最深を記録した。この豪雪によって除雪に起因する人身事故が多発するとともに、多くの建物が倒壊した⁽¹⁾。これら倒壊した建物をみると、比較的スパンが大きい木造倉庫や空き家が中心であった。空き家において倒壊の被害が生じた要因には、その各種部材の劣化・腐朽が一つとして挙げられるが、室内を使用していないことから冬期は暖房を行っておらず、屋根での融雪量が少なくなったため、想定以上の屋根雪が堆積していたことも要因として挙げることができる。空き家は、年々増加の一途をたどっており、豪雪の際には、多くの空き家が倒壊に至る可能性がある。この場合、損傷

した部材が飛散して隣地に到達する恐れや、損傷した部材の除却が進まずに長期間にわたって部材が残存する恐れがある。従って、住宅の耐雪性能を把握するとともに、その性能の目安として空き家の倒壊を免れるように補強や雪下ろし等のメンテナンスを行う必要がある。しかし、在来軸組構法住宅の耐雪性能に言及した既往の研究は皆無に等しく、その性能の目安を捉えることができないのが現状である。

このような背景から本研究では、北海道に建築された在来軸組構法住宅を対象に、その耐雪性能の実態把握を試みた。

2. 研究方法

木造住宅の耐雪性能は、小屋梁、母屋、あるいは垂木などの横架材の断面で決定される。これら構造

* 北海道科学大学工学部建築学科

** 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所

*** 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻

† 北海道科学大学

部材の設計基準について建築基準法をみると、在来軸組構法住宅は、詳細な構造計算に基づいて安全性を確認する義務が課せられていない。耐震性については、簡易構造計算である壁量計算を行うこととしている。しかし、耐雪性能を支配する横架材については、精神規定のみが規定されており、詳細な構造計算が義務化されていない。従って、これまでに建築された在来軸組構法住宅の耐雪性能は、法律に基づいてその性能が管理されていないため、不明な点が多いのが現状である。このようなことから本研究では、既存の在来軸組構法住宅における図面を収集し、それぞれの住宅における小屋梁および垂木の耐雪性能を分析した。

2.1 対象とした在来軸組構法住宅の概要

本研究で対象とした在来軸組構法住宅の建設地と棟数を表 1 に示す。表のように、合計 98 棟の図面を収集した。建設地は、石狩振興局管内の札幌市と後志振興局管内の共和町・岩内町で大半を占めている。その他は 1~6 棟で構成されている。これらの住宅の図面から耐雪性能に関わる小屋梁および垂木の断面およびスパン、さらに、垂木の軒の出を抽出した。なお、小屋梁においては、耐雪性能を支配するスパンと梁せいが最も大きい部材を抽出した。次に、対象とした住宅の屋根形状、最大梁せい、および垂木の断面を図 1 に示す。図のように、屋根形状をみると、無落雪屋根と勾配屋根が概ね 1:1 の割合で構成されている。最大梁せいをみると、200~300mm の梁せいが大半を占め、300mm 以上の梁せいは 2000 年以降の住宅で見受けられた。垂木の断面をみると、45×45mm と 45×55mm に大別でき、45×45mm は 1999 年以前の住宅で、45×55mm、あるいは、それより大きい断面は 2000 年以降の住宅で見受けられた。ここで、小屋梁および垂木のそれぞれの建築年と梁せい／スパンとの関係、垂木せい／軒の出との関係を図 2 に示す。なお、図中の凡例は住宅が属している振興局で表している。図のように、小屋梁の場合をみると、1999 年以前が札幌市などの石狩振興局管内、2000 年以降が共和町や岩内町などの後志振興局管内で構成されているが、梁せい／スパンの値は 0.06~0.1 の範囲にあり、梁せい／スパンの建築年および地域依存性はそれほど大きくない状況である。次に、建築年と垂木せい／軒の出との関係を見ると、無落雪屋根で軒の出がない住宅は垂木せい／軒の出の値を 0.5 として表示しているが、その他において軒の出が存在する住宅では、

表 1 本研究で対象とした住宅の建設地と棟数

振興局	市町村	棟数
石狩	札幌市	35
	石狩市	6
	江別市	2
	北広島市	1
上川・宗谷	旭川市	1
	美瑛町	1
	枝幸町	1
後志	共和町	32
	岩内町	10
	倶知安町	2
	寿都町	2
	二セコ町	1
渡島・胆振	函館市	1
	伊達市	1
十勝	帯広市	1
	音更町	1
合計		98

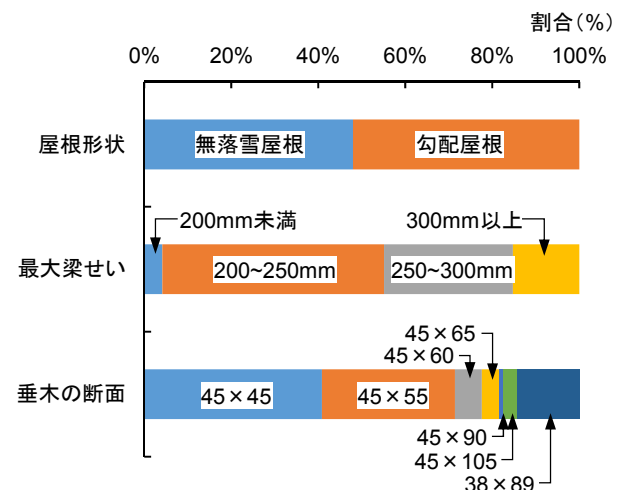


図 1 図面から収集した住宅の各種仕様

垂木せい／軒の出の値が 0.05~0.2 の範囲にあり、小屋梁に比べてばらつきが大きい。建築年ごとにみると、1999 年以前に比べて 2000 年以降の垂木せい／軒の出の値が大きい傾向を示す。これは、2000 年以降の住宅では 1999 年以前で用いられている断面に比べて大きい 45×55mm の垂木が主となっていることが要因である。特に、2000~2005 年をみると、他に比べて垂木せい／軒の出の値が大きくなっているが、38×89mm の垂木が主に用いられていたためである。

以上の結果をみると、小屋梁は建築年および地域依存性は小さいが、垂木については、建築年代で使用された断面が異なる傾向を示し、その年代ごとに

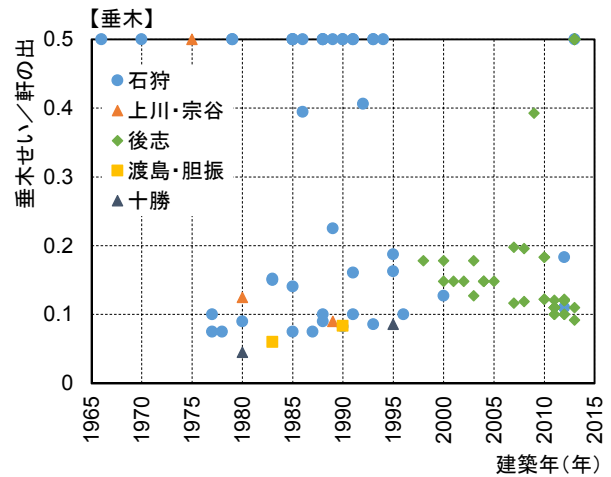
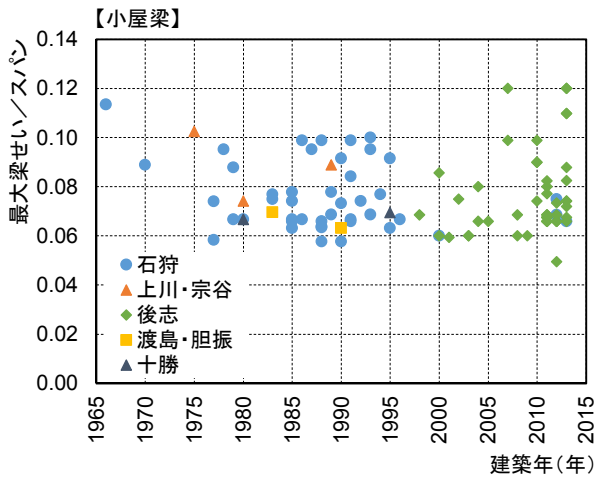


図2 建築年と梁せい/スパンおよび垂木せい/軒の出との関係

耐雪性能が変化する可能性がある。

2.2 損傷積雪深の算定方法

本研究では、各住宅の小屋梁および垂木のそれぞれの損傷する際の屋根上積雪深（以下、損傷積雪深という。）を算定することにより各部材の耐雪性能を把握することとした。小屋梁の損傷積雪深を算定するための構造モデルを表2に示す。表のように、屋根の雪荷重が垂木、母屋、小屋束の順に伝達し、その小屋束から小屋梁へ荷重が作用するモデルとした。本研究で対象とした住宅では、表に示す4種類のモデルが存在した。これらのモデルに基づいて、まず、損傷荷重 P を算定した。 P は、荷重の継続期間に関する係数を C_D 、材料の基準強度を F_b 、断面係数を Z 、小屋梁のスパンを L_G 、構造モデルによる係数を k_M とすると、以下の式1)で表される。

$$P = \frac{C_D \cdot F_b \cdot Z}{L_G \cdot k_M} \quad \dots\dots\dots 1)$$

次に、損傷積雪深 d は、荷重係数を C_L 、単位積雪重量を ρ 、屋根の固定荷重を D_L 、小屋束のピッチを L_1 、小屋梁のピッチを L_2 として以下の式2)で表される。

$$d = \frac{1}{C_L \cdot \rho} \left[\frac{P}{L_1 \cdot L_2} - D_L \right] \quad \dots\dots\dots 2)$$

荷重の継続期間に関する係数 C_D および荷重係数 C_L は、損傷積雪深が小さく算定される中短期（短期積雪）を想定したことから、 $C_D=1.6/3$ 、 $C_L=1.0$ とした。小屋梁の断面係数 Z は、小屋束と小屋梁との短ほぞ接合による断面欠損を考慮して0.85倍した⁽²⁾。構造モデルによる係数 k_M は表中に示す通りであり、単位積雪重量は 3.0kN/m^3 とした。小屋束のピッチ L_1 は

表2 小屋梁の構造モデルと係数 k_M

小屋梁の構造モデル	k_M
	$\frac{1}{4}$
	$\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$
	$\frac{3}{5}$

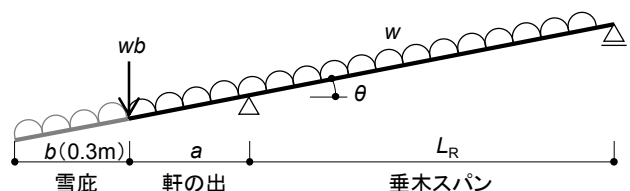


図3 垂木の構造モデル

該当する構造モデルに応じて算定し、小屋梁のピッチ L_2 は図面から住宅ごとに直接読み取った。

垂木における損傷積雪深を算定するための構造モデルを図3に示す。図のように、母屋の上部に垂木

が取り付けられているものとし、軒桁から垂木が延長することにより軒の出が生じているモデルとした。実際には、軒から棟までの連続梁モデルとなるが、母屋間の最大曲げモーメントを安全側で評価することを目的として単純梁で構成するようにした⁽²⁾。雪荷重は等分布荷重として作用することとし、軒先に雪庇が形成されている場合は等分布荷重のみを雪庇分延長し、その雪庇の荷重は軒先に集中荷重として作用させた。雪庇の出については、30cm とした。垂木の損傷積雪深 d は、軒部と中間部のそれぞれで算定し、いずれか小さい方の値とした。まず、軒部の損傷荷重 w は、荷重の継続期間に関する係数を C_D 、材料の基準強度を F_b 、垂木の断面係数を Z 、垂木の勾配を θ 、軒の出を a 、雪庇の出を b とすると、以下の式 3) と 4) で表される。

$$w = \frac{2C_D \cdot F_b \cdot Z \cdot \cos\theta}{a^2 \cdot \alpha} \quad \dots\dots\dots 3)$$

$$\alpha = 1 + \frac{2b}{a} \quad \dots\dots\dots 4)$$

中間部の損傷荷重 w は、最大曲げモーメント力が生じる距離を x 、垂木のスパンを L_R とすると、以下の式 5) と 6) で表される。

$$w = \frac{2C_D \cdot F_b \cdot Z}{x^2 \cdot \cos\theta} \quad \dots\dots\dots 5)$$

$$x = \frac{L_R^2 - a^2 - 2ab}{2L_R \cdot \cos\theta} \quad \dots\dots\dots 6)$$

本研究では、上記の軒部と中間部のうち、小さい損傷荷重から損傷積雪深 d を算定した。損傷積雪深 d は、荷重係数を C_L 、単位積雪重量を ρ 、垂木ピッチを L_3 、屋根の固定荷重を D_L とすると、以下の式 7) で表される。

$$d = \frac{1}{C_L \cdot \rho} \left(\frac{w}{L_3} - D_L \right) \quad \dots\dots\dots 7)$$

荷重の継続期間に関する係数 C_D および荷重係数 C_L は小屋梁の場合と同様とした。垂木の断面係数 Z は短ほぞ等による欠損がないことから、その値を低減しないこととした。また、単位積雪重量は小屋梁と同じく 3.0kN/m^3 とし、垂木のピッチ L_3 はいずれの住宅においても 455mm であった。

2.3 材料の基準強度と損傷積雪深の解析方法

本研究では、材料の基準強度は一定ではなく、ばらつきを有するものであると捉えた。既往の強度試験⁽³⁾で得られた北海道産トドマツの平均値および標準偏差を用いて正規乱数を発生させ、これらの様々な基準強度を各住宅に割り当て、部材の損傷に対して厳しい条件、すなわち、全住宅から求められる損傷積雪深の平均値が小さくなる基準強度の組合せをモンテカルロ的に導いた。正規乱数による組合せ導出の繰り返し回数は 20 万回とした。なお、本研究では、部材の腐朽・劣化に伴う基準強度の低減は考慮していない。ここで、材料の基準強度 F_b の確率分布の一例を図 4 に示す。図のように、既往の強度試

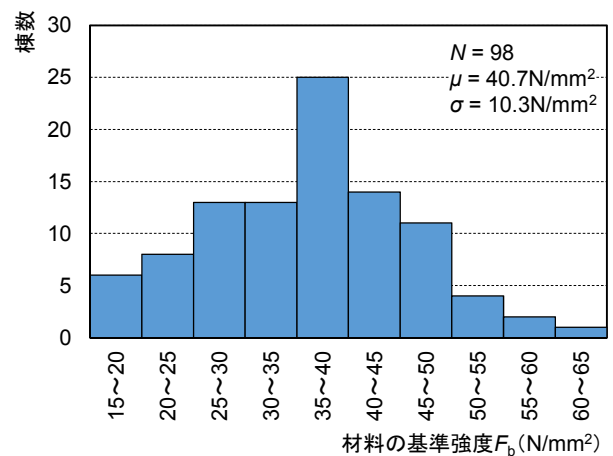


図 4 基準強度の確率分布

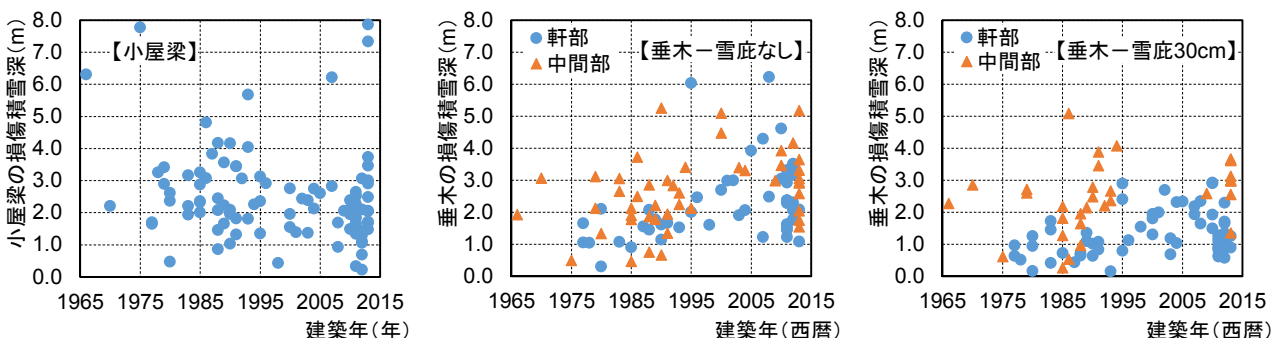


図 5 建築年と小屋梁および垂木の損傷積雪深との関係

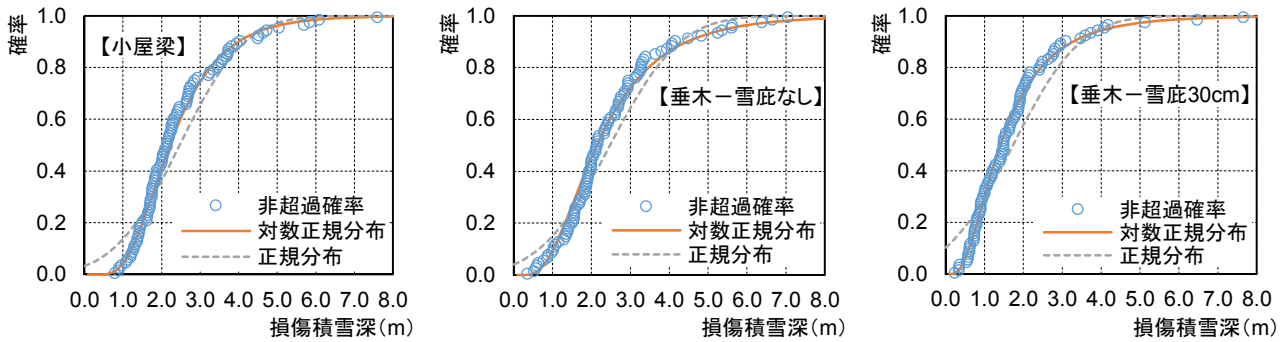


図6 小屋梁および垂木の損傷確率と確率分布

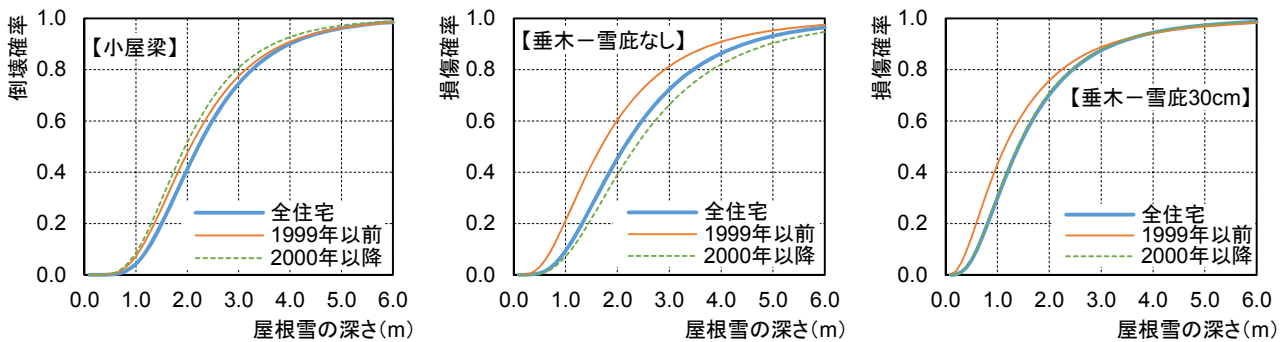


図7 小屋梁および垂木の被害関数

験で得られた平均値 $\mu = 40.7 \text{ N/mm}^2$ ，標準偏差 $\sigma = 10.3 \text{ N/mm}^2$ の正規分布に従っている。

3. 研究結果

各住宅の建築年と小屋梁および垂木の損傷積雪深との関係を図5に示す。図のように、小屋梁の場合をみると、建築年と損傷積雪深との間に明瞭な相関関係はみられない。小屋梁の損傷積雪深は、0.5～5.0mの範囲で大きくばらついており、8.0mにまで達する住宅も存在している。このように、小屋梁の損傷積雪深は、建築年に依存しない傾向を有していることがわかる。次に、建築年と雪庇がない場合における垂木の損傷積雪深との関係をみると、ばらつきが大きいものの、新しい住宅ほど損傷積雪深が増加する関係がみられる。損傷箇所についてみると、軒部で損傷する住宅と中間部で損傷する住宅がそれぞれ約50%ずつの割合となっている。次に、雪庇がある場合における垂木の損傷積雪深をみると、雪庇がない場合に比べて損傷積雪深が小さくなるとともに、建築年と損傷積雪深との間に明瞭な相関関係がみられなくなった。損傷箇所においては、軒部で損傷する住宅が増加した。このように、雪庇の形成は軒部の損傷リスクを大きく高めている。

以上の結果をみると、損傷積雪深は、小屋梁および垂木のいずれにおいてもばらつきが大きく、単純

な建築年と損傷積雪深との関係から推定することが難しい。ここで、各住宅の損傷積雪深から非超過確率を求め、被害関数の構築を試みた。損傷積雪深の非超過確率は、各住宅の損傷積雪深を大きい順に並べ替え、Hazenプロットに基づいて算定した。次に、損傷積雪深と非超過確率との関係に適合する累積分布関数を検討した。その結果を図6に示す。図のように、小屋梁、雪庇なしの垂木、および雪庇ありの垂木で累積分布関数の形状が異なるものの、いずれにおいても対数正規分布の累積分布関数で対応することが可能である。次に、小屋梁および垂木の被害関数として表したものを図7に示す。なお、小屋梁が損傷した場合を倒壊、垂木が損傷した場合を損傷と捉え、屋根雪の深さと倒壊確率および損傷確率との関係で被害関数を表している。また、全住宅を対象として導いた被害関数に加えて、1999年以前と2000年以降のそれぞれの被害関数も導いた。図のように、小屋梁における全住宅を対象とした被害関数をみると、屋根雪の深さが1.0m程度の場合、倒壊確率は5%程度と小さい。屋根雪の深さが2.0mに達すると倒壊確率は約40%となり、急激に倒壊リスクが高くなる。倒壊確率が80%以上で大半の住宅が倒壊に至る屋根雪の深さは3.0m以上である。建築基準法の構造計算で規定されている設計用積雪深は、札幌市や共和町では1.5m前後であり、その量が屋

根上に堆積した場合の倒壊確率は約 20%である。このような状況を見ると、小屋梁の耐雪性能は、現行の建築基準法の水準に達しているものと考えられる。次に、建築年代別の被害関数を見ると、1999 年以前と 2000 年以降とで被害関数の形状が近似している。建築基準法で規定している設計用積雪深は、2000 年に大幅な改訂がなされ、大半の地域で設計用積雪深が増加しているが、住宅の小屋梁においては、その設計用積雪深の増加の影響がみられないことになる。在来軸組構法住宅の横架材は、詳細な構造計算が義務化されておらず、主に経験則に基づいて小屋梁の断面が決定されているものと考えられる。その経験則によって小屋梁の耐雪性能がこれまで確保されてきたという結果であると捉えることもできる。

垂木における全住宅を対象とした雪庇がない場合の被害関数を見ると、屋根雪の深さ 1.0m で損傷確率が約 10%、屋根雪の深さ 2.0m で損傷確率が約 45%であり、小屋梁に比べて損傷リスクが高い。建築年代別で見ると、1999 年以前の住宅に用いられている垂木の損傷リスクが 2000 年以降の住宅に比べて高く、屋根雪の深さが 1.0m の場合、損傷確率は約 20%にまで達する。これは、古い住宅ほど断面の小さい垂木が用いられていることが要因である。これに対し、雪庇がある場合の被害関数を見ると、前述でみられた建築年代の違いによる被害関数の差異は小さい。損傷リスクは、屋根雪の深さ 1.0m で損傷確率が約 35%に達しており、雪庇による損傷リスク増加は顕著である。このように、垂木断面の大きさの効果がみられなくなるほど雪庇の重量が垂木に及ぼす影響が大きいことがわかる。

以上の結果を見ると、垂木の損傷リスクが小屋梁に比べて高く、豪雪の際には軒の損傷が顕著にみられるものと考えられる。特に、雪庇が形成された軒部は、雪庇の荷重が軒先に付加されることから、損傷リスクは高くなる。軒部の損傷は、その周辺の屋

根葺材をも損傷させ、漏水のきっかけになるものと考えられる。漏水した際は、軒部やその他の部材の腐朽・劣化につながることから、軒部の損傷は住宅全体の構造性能低下につながるものと言える。従って、住宅を長期間にわたって維持するためには、雪庇の形成を考慮して軒先を補強することや冬期間において雪庇を除去するなどのメンテナンスが重要になる。

4. まとめ

本研究では、北海道に建築された在来軸組構法住宅の耐雪性能を把握することを目的に、収集した図面を用いて住宅の倒壊・損傷リスクを分析した。

その結果、小屋梁の損傷リスク、すなわち、住宅の倒壊リスクは比較的 low、耐雪性能が確保されている傾向があった。しかし、垂木の損傷リスクは小屋梁に比べて高く、特に、雪庇の形成によって損傷リスクが急激に高くなった。また、このような結果に基づいて、住宅を長期間にわたって維持するための軒部の補強や冬期間における雪庇の除去の必要性を指摘した。今後の課題としては、住宅における構造部材の劣化状況と基準強度に乗じる低減係数との関係を検討する必要があると考えられる。

【参考文献】

- (1) 総務省消防庁：平成 23 年 11 月から平成 24 年 3 月 31 日までの雪による被害状況等，入手先 <<http://www.fdma.go.jp/bn/2012/detail/739.html>>，2014.4.6
- (2) (財)日本住宅・木材技術センター編：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版），2008.12
- (3) 飯島泰男，園田里見：国内の製材曲げ強度試験データの収集と分析 その 1 収集データの概要と分析方法，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），C-1，pp.33-34，2010.9