

積雪寒冷地の木造住宅を対象とした

小屋組の垂木・軒桁接合部の強風被害予測に関する研究*

東北大学大学院工学研究科 吉田 早智子

東北大学大学院工学研究科 今野 大輔

大阪市立大学大学院工学研究科 ガヴァンスキ 江梨

東北大学大学院工学研究科 植松 康

1. はじめに

本研究では積雪寒冷地にある木造住宅の屋根を対象とし、部材耐力と部材に作用する風外力の確率モデルに基づいた強風被害予測モデルを提案することを目的としている。

積雪寒冷地では住宅の設計時に積雪や地震に比べ、強風に対する配慮に欠ける場合が多く¹⁾、過去の強風被害調査結果では屋根部に多くの被害が発生している。屋根部の被害は図1のような大きな構造被害も報告されており、本研究では小屋組の被害に着目する。以上より、本研究では小屋組の被害シナリオを想定するとともに、被害に影響を及ぼすと予想されるパラメータを選定し、耐力と風外力の確率モデルに基づく強風被害予測モデルを構築することを目指す。このような被害予測モデルを用いることで、各パラメータが被害に及ぼす影響を明らかにし、有効な被害低減対策を講じることが可能になると考えられる。

強風被害予測に関して、屋根に作用する風外力は日本建築学会「建築物荷重指針・同解説(2015)²⁾」(以後、「荷重指針」と称す)等によりある程度定められているが、屋根部の耐力に関する系統的な研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では特に耐力モデルに着目する。



図1 小屋組の強風被害

積雪寒冷地における木造住宅の強風被害について、植松ら³⁾は、屋根葺き材の耐力を過去の強風時における風速記録と被害率に基づいて推定しているが、この手法は特定地域の平均的な被害率を推定するものであり、個々の建物特性は反映されない。そこで、本研究では既往の文献や実物大耐力試験の結果に基づき耐力を推定することで、被害に対する各因子の影響評価や個々の住宅に必要な耐風性能を把握することを可能とする被害予測モデルの構築を試みる。

2. 本研究で対象とする小屋組の強風被害のシナリオと検討パラメータ

既往の文献調査に基づいて、積雪寒冷地にある木造住宅の小屋組の強風被害のシナリオと被害に影響を及ぼすと予想されるパラメータを設定する。文献調査の結果、積雪寒冷地にある木

**Development of a stochastic model for predicting wind-induced damage to wooden houses in snowy cold region based on the wind-resistant performance of roof frame joints by Sachiko Yoshida, Konno Daisuke, Eri Gavanski, Yasushi Uematsu

造住宅の強風被害の特徴および屋根の構造的・形態的特徴として以下のように挙げられる。

- 1) 積雪寒冷地では一般に屋根葺き材として金属板葺きが用いられている⁴⁾。瓦葺きの最低勾配が4寸勾配(約21.8°)程度であるのに対し、金属板葺きの最低勾配は2寸勾配(約11.3°)であり⁵⁾、金属板葺きが一般的に用いられる積雪寒冷地では緩勾配の屋根も施工可能である。そのため、積雪寒冷地では緩勾配屋根の住宅が比較的多くみられる。屋根に作用する局部風圧の大きさは屋根勾配によって大きく変わり、隅角部や棟端部の局部風圧は比較的緩勾配(屋根勾配20°程度以下)のときに大きくなるため²⁾、緩勾配屋根の住宅では屋根部の被害が多くなると考えられる。
- 2) 積雪寒冷地の住宅では、雨戸やシャッター等が用いられることがほとんどなく、飛散物によって開口部が破損することが多い。開口部が飛散物によって破損すると、室内圧が高まる。屋根には全体的に負圧が作用するので、室内圧が正圧になると、屋根には大きな上向きの風力が作用することとなる。そのため、小屋組を構成する各部材間の接合部が破壊し、大きな構造被害に結びつくことが多い¹⁾。
- 3) 小屋組の破壊には、柱・梁接合部あるいは垂木・軒桁接合部の破壊が考えられるが、過去の被害調査結果においては垂木・軒桁接合部の破壊が多く発生している⁶⁾。以上より、本研究では小屋組の強風被害のシナリオを以下のように想定する(図2)。「強風による飛散物により開口部が破損」→「内圧の上昇により屋根に大きな風力が作用」→「垂木・軒桁接合部の破損」→「屋根の飛散」

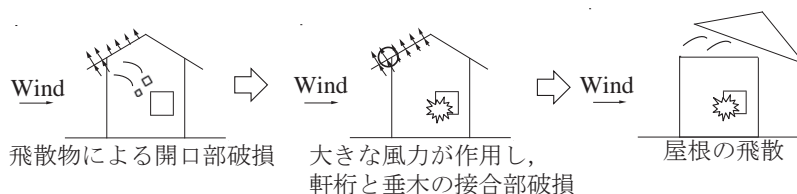


図2 小屋組の強風被害のシナリオ

また、強風被害予測において被害に影響を及ぼすと予想されるパラメータは屋根勾配、屋根葺き材の種類および開口部の破壊の有無の3点とする。

3. 強風被害予測モデルの概要

本研究では耐力 R と風外力 S が対数正規分布に従うと仮定し、次式より被害確率 p_f を計算することとする⁷⁾。

$$p_f = P[R \leq S] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\mu_R / \mu_S)}{\sqrt{v_R^2 + v_S^2}} \right] \quad (1)$$

ここで、 μ_R : 耐力 R の平均値、 μ_S : 風外力 S の平均値、 v_R : 耐力 R の変動係数、 v_S : 風外力 S の変動係数である。また、 $\Phi[\cdot]$ は標準正規分布の確率分布関数を表す。

4. 小屋組の垂木・軒桁接合部の耐力モデル

小屋組の垂木・軒桁接合部の耐力は文献 8) の実物大耐力試験の結果の値に基づき推定する。実物大耐力試験の結果を表 1 に示す。既往の研究⁹⁾においては、試験結果から得られる最大荷重に施工性の影響等によって想定される耐力低減の要因を考慮した補正係数 α を乗ずることによって最大耐力を求めている。以上より、耐力 R の平均値 μ_R および変動係数 ν_R をそれぞれ(2)式および(3)式のように与える。

表 1 実物大耐力試験で得られた結果

屋根勾配	破壊性状	試験体数	平均値
2.5 寸	垂木の割れ	10 体	3.42 kN
2.5 寸	垂木の釘の引き抜け	10 体	3.79 kN
3.5 寸	垂木の割れ	20 体	2.94 kN
6 寸	垂木の割れ	20 体	3.12 kN

$$\mu_R = \mu_\alpha \cdot \mu_{\hat{R}} \quad (2)$$

$$\nu_R = \sqrt{\nu_\alpha^2 + \nu_{\hat{R}}^2} \quad (3)$$

ここで、 $\mu_{\hat{R}}$ および $\nu_{\hat{R}}$ はそれぞれ実物大耐力試験における最大荷重の平均値、変動係数を表す。また、 μ_α および ν_α は補正係数 α の平均値および変動係数であり、それぞれ 0.8 および 0.2 とする⁹⁾。また、屋根勾配が 2.5 寸である場合では、破壊性状として垂木の割れと垂木の釘の引き抜けの 2 つがみられたため、全試験体に対するそれぞれ破壊性状がみられた試験体数の割合を重みづけして破壊確率を求める。

5. 小屋組の垂木・軒桁接合部の風外力モデル

本研究では小屋組の垂木・軒桁接合部を対象とすることから、比較的狭い範囲に作用する風力が対象となる。そこで、そのような風力を荷重指針の「外装材用風荷重」に基づき推定する。外装材等に作用する風荷重 W_C は次式で与えられる。

$$W_C = q_H \hat{C}_C A_C \quad (N) \quad (4)$$

ここで、 q_H : 速度圧(N/m²)、 \hat{C}_C : ピーク風力係数、 A_C : 外装材等の荷重負担面積(m²)であり、 q_H と \hat{C}_C はそれぞれ(5)式、(6)式で与えられる。

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ : 空気密度(=1.22 kg/m³)、 U_H : 屋根平均高さ H における風速(m/s)である。

$$\hat{C}_C = \hat{C}_{pe} - C_{pi}^* \quad (6)$$

ここで、 \hat{C}_{pe} : ピーク外圧係数、 C_{pi}^* : 外装材用の内圧変動の効果を表す係数である。 \hat{C}_{pe} は屋根の形状や勾配、対象部位の場所によって変化する。また、 C_{pi}^* については、ここでは外圧として負圧を考えているため $C_{pi}^* = 0$ とおく。

垂木・軒桁接合部に作用する風外力 S の平均値 μ_S は、図 3 のように垂木をはねだしの単純梁と仮定し、荷重負担面積から次式を用いて推定する。

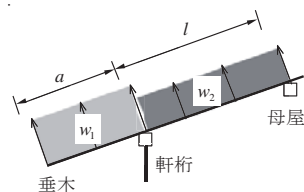


図 3 屋根に作用する風外力

$$\mu_s = \left(w_1 a + \frac{w_1 a^2}{2l} + \frac{w_2 l}{2} \right) \cdot r \quad (7)$$

ここで、 a ：軒先長さ、 l ：軒桁と母屋の距離、 w_1 ：軒先部の単位面積あたりの等分布荷重、 w_2 ：軒先部以外の屋根部の単位面積あたりの等分布荷重、 r ：垂木間隔である。

垂木・軒桁接合部の被害では、軒先部における下からの風の吹き上げ、並びに、開口部の破壊が発生した場合には正の大きな室内圧を考慮する必要がある。

軒先部における下からの風の吹き上げについては、下面のピーク外圧係数が直下の壁面の正のピーク外圧係数 \hat{C}_{pe} に等しいと仮定する¹⁰⁾。なお、 \hat{C}_{pe} は荷重指針より次式で与えられる。

$$\hat{C}_{pe} = k_z(1 + 7I_z) \quad (8)$$

ここで、 k_z ：高さ方向分布係数、 I_z ：乱れの強さである。軒先部のピーク風力係数 \hat{C}_c は、軒先部のピーク外圧係数と壁面の正のピーク外圧係数の差から求める。

飛散物によって窓ガラス等の開口部が破損すると、正の大きな内圧が発生する。そのような場合のピーク内圧係数の値については、荷重指針には規定はないが、平成 12 年建設省告示第 1458 号には +1.5 と定められているので、ここではこの値を用いる。

また、風力とともに固定荷重による押さえ効果も併せて考慮する。したがって、単位面積あたりの屋根部の等分布荷重 w は次式で与えられる。

$$w = \frac{1}{2} \rho U_H^2 |\hat{C}_c| - w_D \cdot \cos \theta \quad (9)$$

以上より、垂木・軒桁接合部に作用する風外力 S の平均値 μ_s は(7)式より推定する。荷重指針によれば固定荷重、風荷重のばらつきは、変動係数で評価するとそれぞれ 0.05~0.1、0.32~0.35 程度の値である。したがって、変動係数 v_s については少し大きめの値として 0.36 と仮定する。

6. 小屋組の垂木軒桁接合部を対象とした強風被害予測

4 章および 5 章から推定される垂木・軒桁接合部の耐力と風外力を用いて、(1)式により被害確率を推定する。なお、計算における仮定、計算対象とする住宅は以下の通りとする。

- 1) 2 階建てを想定し屋根平均高さ H は 7.5 m とする。
- 2) 屋根は切妻屋根とする。また、屋根勾配は 15° (2.5 寸)、 20° (3.5 寸)、 30° (6 寸) とし、4 章に示した方法により推定する。
- 3) 軒先長さ a 、軒桁と母屋の距離 l 、垂木間隔 r はそれぞれ 0.60 m、0.91 m、0.455 m とする。
- 4) 荷重指針より局部風圧低減係数 k_c は 1 とする。また、地表面粗度区分Ⅲを想定し、計算対象とする住宅における高さ方向分布係数 k_z と乱れの強さ I_z はそれぞれ 0.91、0.26 とする²⁾。したがって、壁面の正のピーク外圧係数は 2.58 となり、この値を用いて軒先部における下からの風の吹き上げを考慮する。また、このときの屋根の部位ごとのピーク風力係数 \hat{C}_c の絶対値と屋根勾配の関係を図 4 に示す。
- 5) 屋根葺き材は薄鉄板葺き(下地あり)を想定し、荷重指針と

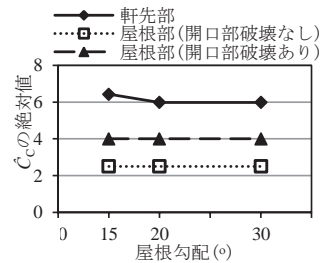


図 4 屋根勾配との \hat{C}_c 関係

文献 11) より, (9) 式の w_D は 256 N/m^2 とする。

以下に各パラメータを変化させたときの予測結果を示す。また, 具体的な被害のイメージを示すために積雪寒冷地で過去に観測された風速として, 1991 年台風 19 号において青森県青森市で記録した最大風速 $29.0 \text{ m/s}^{12)}$, 2004 年台風 18 号において北海道札幌市で記録した最大風速 $21.7 \text{ m/s}^{13)}$ に対する結果の比較を行い, それぞれの風速における被害確率を表 2 に示す。

(1) 屋根勾配の影響

図 5 に開口部の破壊を想定しないとき, 屋根勾配 θ が 15° , 20° および 30° の場合について, 被害確率が風速によってどのように変化するかを示す。図 4 より, $\theta=15^\circ$ の場合, 軒先部のピーク風力係数は想定した屋根勾配の中では最も大きい値を示しており, 最も大きな風力が作用することになるが, 被害確率は最も小さいという結果になる。このような結果が得られた要因としては, 想定した屋根勾配の中では $\theta=15^\circ$ における耐力値が最も大きく, 屋根勾配の変化が風外力に与える影響よりも耐力に与える影響が大きかったためであると考えられる。さらに, 表 2(a) より $U_H=21.7 \text{ m/s}$ ではほとんど被害が見られず, $U_H=29.0 \text{ m/s}$ においてもどの屋根勾配でも被害確率は 0.10 以下であることが分かる。しかし, 図 5 より $U_H=25 \text{ m/s}$ 程度から被害確率が急激に増加し始めることから, このような風速範囲では, わずかな風速増加でも被害確率が大きく増大する結果となる。

(2) 屋根葺き材の種類による影響

前述のように, 積雪寒冷地の木造住宅では屋根葺き材として金属板葺きが多く用いられている。そこで, 図 6 に屋根勾配 θ を 20° とし, 開口部の破壊を想定しないとき, 屋根葺き材が金属板葺きおよび瓦葺きの場合の被害確率と風速の関係を示す。ここで, 瓦葺きの場合については, 荷重指針より和形粘土瓦葺き(ふき土あり)を想定した固定荷重 930 N/m^2 を用いた。表 2(b) より, $U_H=21.7 \text{ m/s}$ および $U_H=29.0 \text{ m/s}$ いずれにおいても被害確率は 0.10 以下と小さいものの, $U_H=29.0 \text{ m/s}$ では金属板の場合の被害確率が瓦葺きの場合の約 6 倍になっている。小屋組の被害が発生する前に屋根葺き材の被害が発生し屋根部の固定荷重や風荷重が変化する可能性は考えられるものの, 今回の計算結果では, 屋根葺き材として金属板等の軽い材料が用いられるといった積雪寒冷地における木造住宅の特徴は被害を増大させているといえる。

(3) 開口部の破壊による影響

積雪寒冷地における木造住宅の特徴として, 雨戸やシャッターがほとんど用いられていないことが挙げられる。図 7 に屋根勾配を 20° としたとき, 飛散物による開口部の破壊により正の大きな室内圧が発生すると被害確率がどのように変化するかを示す。表 2(c) より, $U_H=21.7 \text{ m/s}$ ではほとんど被害がみられない。しかし, $U_H=29.0 \text{ m/s}$ では開口部の破壊がある場合の被害確率が開口部の破壊がない場合の約 1.5 倍となっている。

以上より, 今回の予測結果では積雪寒冷地の強風被害を低減させる方法として, 屋根葺き材として重い部材を用いることや開口部の保護を行うことが示された。しかし, 積雪寒冷地において瓦葺き等の重い屋根を用いることは地震や積雪の影響を考慮すると, 適切ではない。したがって, 屋根葺き材の留め付け強度を高めることや垂木・軒桁接合部の強度の向上, 開口部の保護を十分に行う等の強風時の対策の徹底が望まれる。

表2 風速 29.0 m/s および 21.7 m/s のときの被害確率

(a) 屋根勾配の影響				(b) 屋根葺き材の種類の影響			(c) 開口部の破壊による影響		
風速	被害確率			風速	被害確率		風速	被害確率	
(m/s)	$\theta=15^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	(m/s)	瓦葺き	金属板葺き	(m/s)	破壊なし	破壊あり
21.7	0.000	0.001	0.001	21.7	0.000	0.001	21.7	0.000	0.001
29.0	0.034	0.070	0.058	29.0	0.012	0.070	29.0	0.070	0.116

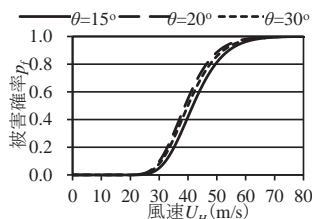


図5 屋根勾配による被害確率の変化

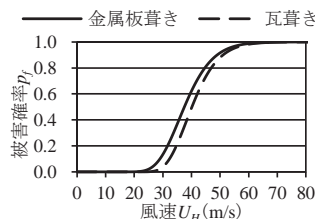


図6 屋根葺き材の種類による被害確率の変化

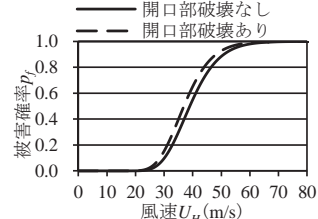


図7 開口部の破壊による被害確率の変化

7. まとめと今後の展望

本研究では、積雪寒冷地の木造住宅を対象とし、住宅の構造的・形態的特徴や強風被害の特徴を考慮した強風被害予測モデルを提案することを最終目標としている。本報では、小屋組の強風被害に着目し、文献調査や現地調査、耐力試験に基づき、強風被害予測モデルを提案した。部材の劣化の評価方法や連鎖的な被害を十分に考慮できていないこと等の課題は残るが、それらの検討を行うことで予測精度を向上できると考えられる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、北海道立北方建築総合研究所主査・堤拓哉氏、日本住宅・木材技術センター長・岡田恒氏および大和ハウス工業株式会社総合技術研究所・西塔純人氏、藤井雅也氏より有益な助言を得た。

また、本研究は、日本学術振興会科学研究費・若手B「強風災害に対する日本住宅のリスク評価と台風性能向上度の可視化(2015~2017)(課題番号15K20861)」(研究代表者・ガヴァンスキ江梨)、および(公財)LIXIL住生活財団2014年度研究助成「高齢化の進行する積雪寒冷地における空き家等老朽化住宅の強風被害ポテンシャルに関する研究」(研究代表者・植松康)の助成による。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 植松 康, 佐々木 和彦, 野澤 壽一, 「自治体および消防署における住宅の強風被害調査の実態と建築工学的観点からの提案」, 日本風工学会誌, 第83号, pp. 57-64, (2000)
- 2) 日本建築学会, 「建築物荷重指針・同解説」, 日本建築学会, (2015)
- 3) 植松 康, 三吉 拳志, 佐々木 和彦, 山田 大彦, 吉田 正邦, 「東北地方における台風と住宅の強風被害予測モデルに関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第525号, pp. 27-32, (1999)
- 4) 千葉 隆弘, 苔米地 司, 高橋 徹, 植松 武是, 「積雪地域の都市部における木造住宅の屋根雪処理別の地震対策について」, 日本雪工学会誌, 第23巻, 第5号, pp. 327-335, (2007)
- 5) 原田 秀昭, 「ゼロからはじめる「木造住宅」入門」, 彰国社, (2009)
- 6) 高橋 章弘, 堤 拓哉, 南 慎一, 「2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による被害: その1 建築物の被害状況」, 日本建築学会北海道支部報告集, 第80号, pp. 179-184, (2007)
- 7) 柴田 明德, 「確率的手法による構造安全性の解析」, 森北出版株式会社, (2005)
- 8) 吉田 早智子, 今野 大輔, ガヴァンスキ 江梨, 植松 康, 「積雪寒冷地の木造住宅の強風被害予測に関する研究—小屋組接合部の耐力評価—」, 東北地域災害科学研究, 第52巻, pp. 85-90, (2016)
- 9) 喜々津 仁密, 河合 直人, 「構成部材の引張荷重試験に基づく木造小屋組の耐風性能評価に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第646号, pp. 2181-2188, (2009)
- 10) 一般社団法人 日本金属屋根協会, 「風荷重算定に対する考え方」, <http://www.kinzoku-yane.or.jp/technical/pdf/special-13.pdf>, (2016.10)
- 11) (財)日本住宅・木材技術センター, 「木造の設計—木造建築物の構造設計の手引きと計算例—」, 新日本法規出版株式会社, (1983)
- 12) 気象庁, 「最低海面気圧, 最大風速, 最大瞬間風速観測表(平成3年9月25日~9月28日)」, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/1991/19910912ty/199109254_b2.html, (2016.10)
- 13) 気象庁, 「最低海面気圧, 最大風速, 最大瞬間風速観測表(平成16年9月4日~9月8日)」, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2004/20040904/20040904_b2.html, (2016.10)