

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－*

東北大学工学部建築・社会環境工学科 吉田早智子
 東北大学大学院工学研究科 今野大輔
 京都大学防災研究所 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

台風や竜巻などの強風による建物被害は屋根部において多く、既往の木造住宅等の強風被害事例では、屋根葺き材だけではなく野地板や小屋組の被害も多い¹⁾。また、北海道、東北地方などの積雪寒冷地では、住宅の設計時において積雪や地震に比べて強風に対する配慮が十分ではないと考えられる^{2) 3)}。具体的には、雨戸が無い住宅が多いため飛散物等による開口部の被害が起きやすいことなどが挙げられる。また、開口部の破壊は強風が室内に吹き込み内圧が上昇することで屋根部において大きな構造被害に結びつくと考えられている²⁾。そのため、1991年の台風19号による東北地方の強風被害、2004年の台風18号による北海道の強風被害(図1)、2006年11月に佐呂間町で発生した竜巻被害などにおいて小屋組の被害が多く報告されている^{4) 5)}。また、このとき小屋組の被害の多くは垂木接合部にみられている。このような背景から、積雪寒冷地の小屋組の被害を低減するための対策を行うことが必要である。

小屋組の被害を低減させるためには、小屋組の強風被害予測モデルを確立する必要がある。その結果から適切な耐風性能が確保できるように設計や修繕を行うことで被害を最小限に留めることができると考えられる。このような確率モデルを確立するためには、小屋組の耐力のモデルと小屋組に作用する外力のモデルを確立する必要がある。植松ら⁶⁾は、耐力のモデルを過去の強風時の風速記録と被害率に基づいて推定しているが、この手法は積雪寒冷地の個々の建物の建築様式に対応させたものではない。そこで、本研究では実物大耐力試験の結果に基づいて、耐力のモデル化を行う。垂木接合部の耐力試験に関しては、喜々津・河合の研究⁷⁾がある



図 1 小屋組の被害

が、その試験条件は1パターンにとどまっており、積雪寒冷地の住宅の特徴に対応した各種の垂木接合部の耐力を包括的に評価できるとは言い難く、様々な接合部パターンに対応した小屋組の耐力モデルの確立が必要であると考えられる。以上より、本研究の目的を小屋組の強風被害予測のための、実物大耐力試験の結果に基づいた耐力モデルの提案とする。

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

2. 試験概要

既往の研究よれば積雪寒冷地の大半の地域で勾配屋根が用いられており、用いられている屋根勾配は様々である⁸⁾。したがって、本試験では屋根勾配など様々なパラメータを考慮し実物大耐力試験を行い、耐力に及ぼすそれらのパラメータの影響を検討する。

本試験では、木造軸組工法で建てられた住宅の垂木軒桁接合部を再現した試験体を用いて引張載荷を行う。試験目的は主に以下の2点であり、これらは本研究で最終的に目標としている強風被害予測モデルにおける耐力評価の一要素となる。具体的な検討課題は以下のようである。

- (1) 強風被害予測のための、垂木接合部耐力の統計値の取得
- (2) 屋根勾配、載荷速度、位置決めの釘の有無、垂木の支持間隔、軒桁の材種による耐力への影響の検証

2.1 試験体

試験体はハウスメーカーの方から伺った最も一般的な材料、工法を選択し作成した。試験体の概要を図2に示す。なお、接合部については、Zマーク表示金物規格のひねり金物ST-12による接合とした。垂木については断面寸法を60×45 mm、長さを540 mm、材種をスギとした。軒桁については断面寸法を105×105 mm、長さを300 mm、材種をスギ、またはベイマツとした。表1に試験体一覧を示す。試験においては、屋根勾配、載荷速度、垂木の位置を合わせるために打つ位置決めの釘の有無、垂木の支持間隔、軒桁の材種の5つをパラメータとする。屋根勾配の影響は3.5-2P、2.5-2P、6-2Pを比較することで、また載荷速度の影響は3.5-2P、3.5-8P、3.5-32Pを比較することで検討できる。なお、3.5-2CNは喜々津らの行った試験⁷⁾で用いたパラメータとすべて同じにすることで、本実験の妥当性検討を行うことを目的として加えた。また最後の3.5-2Cは、それ以外の試験をすべて行った結果、位置決めの釘の有無が垂木接合部耐力に与える影響が大きいと推察されたため、位置決めの釘の有無の影響を検することを目的として加えた。試験体数は各20体であり、各条件間で平均寸法、平均含水率、平均密度が概ね等しくなるように設定した。さらに、木材は木の根に近い部分(元)と梢に近い部分(末)では、性質が異なるため、各条件間で偏りがないように注意して試験体の作成を行った。

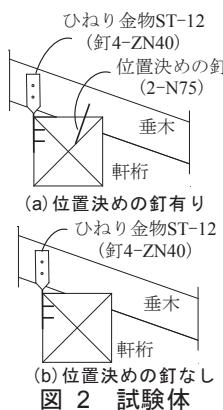


表1 試験体一覧

試験記号	屋根勾配	載荷速度 (kN/min)	位置決めの釘	支持間隔 (垂木)	材種 (軒桁)	試験体数
3.5-2P	3.5寸 (19.3°)					
2.5-2P	2.5寸 (14.0°)	2				
6-2P	6寸 (31.0°)		有	300	ベイマツ	
3.5-8P		8				
3.5-32P	3.5寸	32				
3.5-2CN	(19.3°)	2	無	400	スギ	
3.5-2C			有			

2.2 試験方法

本試験は、(公財)日本住宅・木材技術センター発行の「木造建築物用接合金物認定事業における接合金物試験法規格(Zマーク表示金物)」⁹⁾の中の「垂木一軒桁金物の試験方法」を参考に行った。実際の風荷重は垂木に対して垂直に作用することから、本試験では図3のように試験体を傾けて垂木に垂直に力を作用させた。また、安全性を考慮し加力が最大荷重に達した後、最大荷重の10%にまで低下するまで加力することとした。

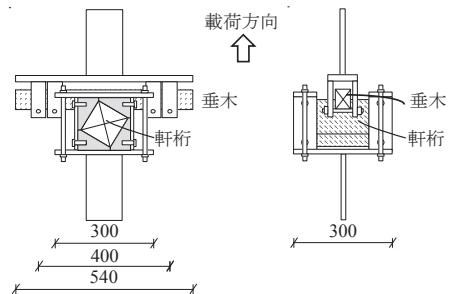


図3 載荷方法

3. 試験結果

各条件下でなされた20体の試験結果について最大荷重の平均値、標準偏差、変動係数、最大荷重、最小荷重を表2に示す。

破壊性状は図4に示すように、垂木の割れ、垂木に取り付けてあるひねり金物の釘の引き抜け、軒桁の割れ、軒桁に取り付けてあるひねり金物の釘の引き抜けの4種類に分類される。

表2 試験結果の統計値

試験記号	平均値	標準偏差	変動係数	最大荷重	最小荷重
3.5-2P	2.94 (kN)	0.48 (kN)	0.16	4.18 (kN)	2.10 (kN)
2.5-2P	3.60 (kN)	0.51 (kN)	0.14	4.46 (kN)	2.77 (kN)
6-2P	3.12 (kN)	0.53 (kN)	0.17	3.98 (kN)	2.01 (kN)
3.5-8P	3.40 (kN)	0.47 (kN)	0.14	4.37 (kN)	2.52 (kN)
3.5-32P	3.29 (kN)	0.33 (kN)	0.10	4.01 (kN)	2.54 (kN)
3.5-2CN	2.44 (kN)	0.37 (kN)	0.15	3.11 (kN)	1.83 (kN)
3.5-2C	3.17 (kN)	0.41 (kN)	0.13	3.94 (kN)	2.59 (kN)



図4 破壊性状の分類

3.1 試験の妥当性検討

最大荷重を昇順に並べ、Thomas法(式(1.1))を用いてそれぞれの最大荷重に対する非超過確率を計算した結果、累積分布関数、破壊確率を図5に示す。

$$F = \frac{i}{N+1} \quad (1.1)$$

ここで、 F : 破壊確率、 i : 昇順に並べたものの順位、 N : 総数

試験体数は、本研究では 20 体であるのに対し、喜々津らの研究⁷⁾では 6 体であったため、図 5 に示したそれぞれの最大荷重の累積分布関数には多少の差がみられたと考えられる。そこで、2 つの分布が同じ分布から得られたものであるという帰無仮説に対して、コルモゴロフ・スミルノフ検定により検証したところ、信頼区間 95%において、その帰無仮説は採択されることが分かった。以上より、本試験は、既往の研究と同様に評価できるといえる。

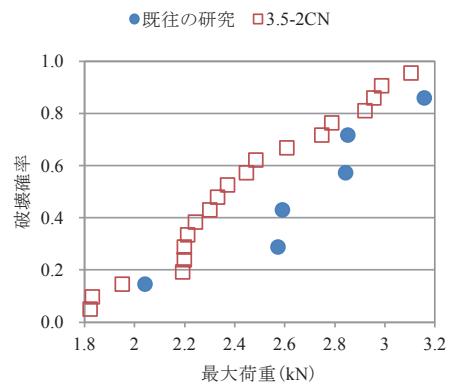


図 5 最大荷重の累積分布関数

3.2 破壊性状

表 3 に、各条件に対する破壊性状と破壊性状ごとの最大荷重の平均値を示す。これより、破壊性状のほとんどが垂木の割れ、垂木の釘の引き抜けであったことが分かる。また、どの条件においても最大荷重の平均値は、破壊性状が垂木の割れである試験体よりも垂木の釘の引き抜けである試験体の方が大きい。

各条件の特徴をみると、屋根勾配が 2.5 寸である 2.5-2P と位置決めの釘が打たれていない 3.5-2CN は、破壊性状として垂木の釘の引き抜けが特に多い。これは、2.5-2P においては低勾配であるため釘の打たれる位置が垂木の上の方になり、割れが起きにくくなるためと推察される。3.5-2CN においては、それ以外の試験体との違いとして、位置決めの釘が打たれていないため、接合部の固定度が低く垂木の回転がしやすいため付加曲げモーメントがかかりやすいうことなどが考えられるが、なぜ破壊性状として垂木の釘の引き抜けが多くみられたのかは不明であった。また、破壊性状として軒桁の割れ、軒桁の釘の引き抜けがみられた 3.5-2CN と 3.5-2C は、いずれも軒桁の材種がスギであった。また、3.5-2CN と 3.5-2C の軒桁の平均密度は、材種が異なるため他の条件よりも小さい値を示していた。木材の力学的特性として一般に密度と各種強度はほぼ比例関係にあることが分かっている¹⁰⁾。したがって、3.5-2CN と 3.5-2C は他の条件よりも軒桁の各種強度が小さいため、破壊性状として軒桁の割れ、軒桁の釘の引き抜けがみられたと考えられる。

表 3 各試験における破壊性状の分類と平均最大荷重

試験記号	垂木の割れ	釘の引き抜け		軒桁の割れ	釘の引き抜け
		垂木	軒桁		
3.5-2P	20体				
	2.94 (kN)				
2.5-2P		10体			
		3.42 (kN)	3.79 (kN)		
6-2P	20体				
	3.12 (kN)				
3.5-8P		3体			
		3.36 (kN)	3.61 (kN)		
3.5-32P	19体	1体			
	3.28 (kN)	3.54 (kN)			
3.5-2CN	7体	12体		1体	
	2.33 (kN)	2.45 (kN)		2.92 (kN)	
3.5-2C	17体	1体	1体	1体	
	3.12 (kN)	3.47 (kN)	3.44 (kN)	3.30 (kN)	

3.3 各パラメータの影響

各パラメータの中でも特に影響がみられた屋根勾配、位置決めの釘の影響について以下に示す。

3.3.1 屋根勾配の影響

屋根勾配の影響を検するために 3.5-2P(3.5 寸:19.3°), 2.5-2P(2.5 寸:14.0°), 6-2P(6 寸:31.0°) の結果を比較する。これらの試験体では屋根勾配以外のパラメータはすべて同じである。**表 2** より、最大荷重の平均値は 2.5-2P, 6-2P, 3.5-2P の順に大きいことが分かる。特に、2.5-2P は特に大きな値を示している。次に、**3.1 節**と同じ方法を用いて、最大荷重の平均値の累積分布関数を**図 6(a)**に示す。このとき、3.5-2P と 6-2P, 6-2P と 2.5-2P(垂木の割れ), 2.5-2P(垂木の割れ)と 2.5-2P(釘の引き抜け(垂木))の組み合わせについては、信頼区間 95% のコルモゴロフ・スマルノフ検定によって同じ分布であるという帰無仮説が採択された。2.5-2P(釘の引き抜け(垂木))と屋根勾配が異なる条件の組み合わせでは採択されなかつたが、これは屋根勾配が低勾配である場合においては破壊性状が変化することによると考えられる。しかし、少なくとも今回の結果からは屋根勾配 3.5 寸と 6 寸に対して屋根勾配が耐力値に与える明確な影響は認められない。

3.3.2 位置決めの釘の影響

位置決めの釘の影響を検するために 3.5-2CN(釘なし)と 3.5-2C(釘あり)の結果を比較する。これらの試験体では位置決めの釘以外のパラメータはすべて同じである。**表 2** より、最大荷重の平均値は 3.5-2C の方が、3.5-2CN より大きいことが分かる。これら 2 つの最大荷重の平均値の違いは顕著であり、位置決めの釘の有無が垂木軒桁接合部の耐力に及ぼす影響は大きいと考えられる。次に、**3.1 節**と同じ方法を用いて、最大荷重の平均の累積分布関数を**図 6 (b)**に示す。このとき、3.5-2CN(垂木の割れ)と 2.5-2C(垂木の割れ), 3.5-2CN(釘の引き抜け(垂木))と 2.5-2C(垂木の割れ)については、信頼区間 95% のコルモゴロフ・スマルノフ検定によって同じ分布であるという帰無仮説が棄却された。つまり、位置決めの釘の有無は耐力値に有意の影響を及ぼすと判断できる。

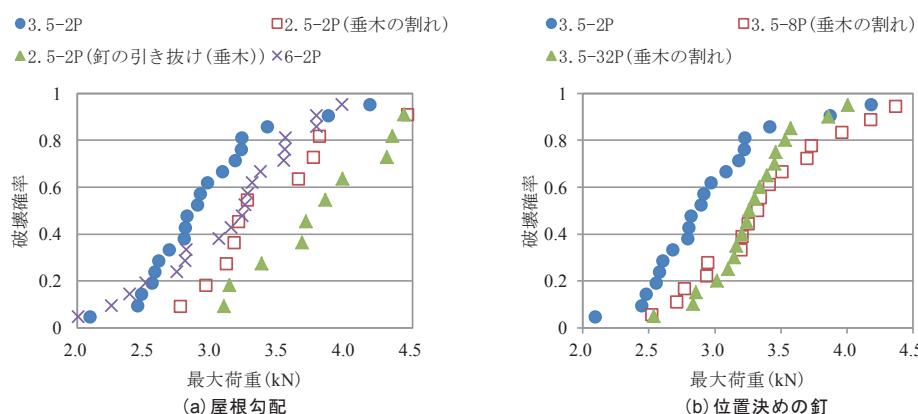


図 6 最大荷重の累積分布関数

4. 確率分布の算定

小屋組の耐力モデルを構築するために、試験で得られた耐力データがどのような確率分布に適合できるかを検する。既往の木材に関する研究¹¹⁾において確率分布として正規分布、対数正規分布、ワイブル分布の適合性を検討していることから、本研究においてもこれら3つの確率分布の適合性を検証する。表4に正規分布、対数正規分布、ワイブル分布に当てはめたときの対数尤度を示し、表中の網掛けしたものが最も適合性の良い確率分布である。対数尤度は、確率分布との適合性を表す指標であり、数値が大きいほど、その確率分布との適合性が良いとされている。表4より、多くの条件で対数正規分布の適合性が最も良いことが分かる。また、2.5-2P(釘の引き抜け(垂木))、6-2P、

3.5-32P(垂木の割れ)、3.5-2CN(釘の引き抜け(垂木))においては、異なる分布間の結果に有意な差が得られなかつたため、喜々津らの研究⁷⁾において、小屋組の耐力の確率分布として用いられている対数正規分布に近似することとする。以上より、小屋組の耐力モデルの確率分布としては概ね対数正規分布を用いることができると考えられるが、破壊性状に変化がある場合は、考慮が必要であるといえる。

表4 各条件の対数尤度

	3.5-2P	2.5-2P	2.5-2P
		垂木の割れ	釘の引き抜け
正規分布	-13.61	-6.81	-6.53
対数正規分布	-12.61	-6.36	-6.62
ワイブル分布	-15.28	-7.61	-6.45
	6-2P	3.5-8P	3.5-32P
		垂木の割れ	垂木の割れ
正規分布	-15.56	-12.25	-6.32
対数正規分布	-16.54	-11.98	-6.43
ワイブル分布	-14.94	-12.97	-7.20
	3.5-2CN	3.5-2CN	3.5-2C
	垂木の割れ	釘の引き抜け	垂木の割れ
正規分布	-1.59	-5.72	-10.25
対数正規分布	-1.12	-5.92	-9.95
ワイブル分布	-2.39	-5.69	-10.72

5. まとめ

実物大耐力試験を行い、小屋組の耐力データを得た。試験の結果から、屋根勾配などのパラメータの影響の検証を行った。また、小屋組の耐力の確率分布としては、概ね対数正規分布を用いることができる事が明らかになった。今後は、小屋組に作用する外力についても算定を行い小屋組の強風被害予測を行う予定である。

参考文献

- 日本建築学会: 2004年の強風被害とその教訓—強風被害が残したもの—, 2006.
- 植松康ら: 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, pp.57-64, 2000.
- 堤拓哉ら: 2006年11月7日北海道佐呂間町で発生した竜巻による建物被害—被害調査に基づく積雪寒冷地の建物被害特性—, 日本風工学会論文集, pp.75-83, 2009.
- 植松康ら: 青森県および秋田県における台風9119号による建物被害, 日本風工学会誌, pp.35-47, 1992.
- 高橋章弘ら: 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(都市防災・竜巻被害, 講演研究論文・計画技術報告), 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.179-184, 2007.
- 植松康ら: 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, pp.27-32, 1999.
- 喜々津仁密, 河合直人: 構成部材の引張載荷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, pp.2181-2188, 2009.
- 千葉隆弘ら: 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, pp.327-335, 2007.
- (公財)日本住宅・木材技術センター: 木造建築物用接合金物認定事業における接合金物試験法規格(Zマーク表示金物), 2015.
- 三橋博三ら: 「建築材料学」共立出版, 2007.
- 飯島泰男: 構造用木材の強度性能評価法の標準化, 木材学会誌 Vol.53 No.2, pp.63-71, 2007.