

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：51101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05934・19K21100

研究課題名（和文）強風の動的荷重効果を考慮した木造住宅屋根部の破損危険度評価およびリスクの可視化

研究課題名（英文）Study on the effect of dynamic wind loading on wind resistance of wooden house roofing

研究代表者

今野 大輔（Konno, Daisuke）

八戸工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：00825325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：近年、台風や竜巻等の強風による建物被害が多く見られる。強風による住宅被害は特に強い風圧の作用する屋根部に多く、「屋根葺き材の飛散」や「屋根-壁接合部の破壊」が多く生じる。本研究においては、「金属板で葺かれる屋根」を対象として、より実現象に即した風荷重を載荷する実験を行い、金属屋根が「どれくらいの風速」で「どのように壊れるか」を明らかにして、その危険性を分かりやすく伝えることを目的としている。研究の結果として、「金属屋根の葺き方」や「風荷重の与え方」の違いにより、壊れ方や破壊風圧が大きく異なることが分かり、今後の課題として経年劣化、施工状態等の実況に応じた耐力評価の必要性があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、強風災害における建物被害の低減に寄与できると考えられる。

現状として、日本の木造住宅の耐力に関する情報は非常に少なく、実際の破損メカニズムも明らかになっていない。さらに、「経年劣化の影響」を考慮した事例も見られず、実際の状況との間には乖離が見られる。より実際の状況に応じた実験・解析、および、個々の建物条件に応じた強風災害リスクの提示を目指すことで、「この建物は危険である」に留まっていたリスク情報を「どれくらい危険なのか」という情報に代えて提供することで、意思決定の判断材料として修繕や改築等により得られる利益を明示できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Metal roofing materials are often damaged during a strong wind event such as a typhoon or a tornado. In order to investigate the failure mechanism and the wind resistance of metal roofing materials, we have conducted a full-scale experiment using Pressure Loading Actuators (PLAs). In the experiment, two types of loading, i.e., dynamic loading simulated by using a wind tunnel test data and ramp loading, are applied to the specimens with metal roofing system assembled with the same way as that used for practical roofs of wooden houses. The experimental results indicate that the failure load of the roof under ramp loading is smaller than that under dynamic loading.

研究分野：建築学，建築構造学，風工学

キーワード：強風災害 金属屋根 実物大動風圧試験 経年劣化 外装材

1. 研究開始当初の背景

近年、台風や竜巻等の強風による建物被害が多く見られる。強風による住宅被害は特に強い風圧の作用する屋根部に多く、「屋根葺き材の飛散」や「屋根-壁接合部の破壊」が多く生じる。屋根部が破損した場合には、飛散物として他の建物にも影響を与えるために、単体としての被害は小さくとも、周囲への被害が連鎖的に生じ(図1)、被害のエリアが広く、社会的インパクトは非常に大きい。

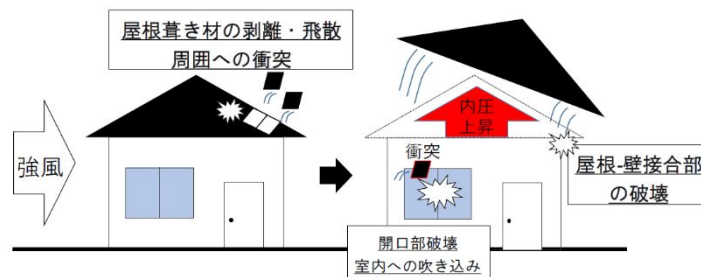


図1 強風による連鎖的被害のイメージ

そのような屋根部被害の低減を目的として、近年では屋根部等の外装材耐力に基づいた強風災害危険度評価が行われている。しかし、その大前提となる、日本の木造住宅の耐力に関する情報は非常に少ない。また、それらの耐力情報の多くは、風の作用を議論する上で最も重要な「動的荷重効果」が考慮されておらず、実際の破損メカニズムも明らかになっていない。さらに、強風被害を多く受けているのは築年数が経過した古い住宅であるが、そのような「経年劣化の影響」を考慮した事例も見られず、実際の状況との間には乖離が見られる。

これまで行われてきた強風災害危険度評価に関する研究では、限定的な耐力情報に基づいており、一般性に欠け、妥当性も十分に検証されていない。さらに、危険度評価結果が住宅の居住者や所有者にとって分かりにくいため、有効に活用されていない。このような様々な問題点を解決するためには、第一に「より実現象に即した部材の耐力情報の取得」が必要であり、その耐力情報を基にすることで、個々の建物条件に応じた強風災害リスクの提示に繋がると考える。そして、危険度評価結果の有用性を向上させるためには、実際に危険度評価結果を通して「住民が感じることや防災意識の変化などを調査」する、住民とのリスクコミュニケーションが有用であると考えられる。そこから得られるフィードバックを基に、より効果的な危険度評価結果の示し方を明らかにできる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、木造住宅を対象として、「(1)動的荷重効果を考慮した実物大耐力実験による屋根部の破損メカニズムの解明および耐力情報の拡充」、「(2)既存の住宅から取り出した部材(屋根接合部、窓ガラス)を用いた実験に基づく経年劣化の影響の把握」そしてその結果に基づいた、「(3)住民にわかりやすい強風災害危険度評価手法の開発」である。

(1)の実験は、東北大学所有の実変動風圧载荷装置を用いることで可能となる。本装置は時々刻々と変動する実変動風圧を高い追従性を持って载荷することが可能な日本で唯一の装置である。本研究では本装置を用いて、「金属屋根葺き材の耐力試験」を行う。屋根部を対象とした実変動風圧载荷実験は日本で初めての試みであることから、独自性の高い実験結果が得られると言える。

(2)の実験は、既存の木造住宅から屋根ふき材や、屋根接合部、窓ガラスを取り出し、それを試験体とした耐力評価実験を行うことで、経年劣化の影響を把握するものである。実際に使われていた部材の品の部材の耐力評価を行うことは日本では事例の少ない手法であり、劣化の影響を実験的に明らかにすることで、後に行う数値シミュレーションの妥当性評価としても用いる。

(3)のリスク評価手法の開発は、住民に分かりやすいリスク情報の提供を行うために、住民とのリスクコミュニケーションを通して、提示したリスク情報の分かりやすさや、防災意識の変化についての調査まで一貫して行う。これまでのリスク評価に関する既往の研究においては、「この建物は危険である」といった情報に留まっていたが、リスクコミュニケーションを通じて、「どれくらい危険なのか」という情報を共有し、意思決定の判断材料として修繕や改築等により得られる利益を明示することを目指している。本研究を通じて、専門家と非専門家間のギャップが解消していくことが期待される。

3. 研究の方法

「風洞実験」による屋根部に作用する風圧の測定

低層建物モデルを対象とした風洞実験及び数値流体解析により、作用する風圧係数を取得する。また、建物が置かれる環境による違いについても検討を行う。

「実物大耐力試験」による風の動的作用を考慮した金属屋根の耐力評価および破損メカニズムの解明

実物大耐力試験においては、木造住宅の屋根構成部材を再現したアセンブリ試験体を作成し、実変動風圧を用いて実物大耐力試験を行う。入力荷重としては、風洞実験において得られた屋根部に作用する風圧係数時刻歴(動的荷重)と、動的効果の影響把握のための対照実験として静的荷重(定荷重、漸増荷重)の載荷を行い、破損メカニズムの解明および動的荷重効果の検討を行う。また、実験のモデルを再現した「有限要素解析」も実施し、詳細な荷重 応力データの取得およびモデルの拡張による汎用性の拡大を目指す。

「既存住宅から取り出した部材を用いた耐力評価実験」による経年劣化の影響把握

既存住宅から取り出した屋根葺き材、屋根接合部、窓ガラスを試験体とした耐力評価実験を実施し、それらの部材を再現した新品の試験体に対して実施した実験結果と比較を行うことで、経年劣化の影響の把握、及び、耐力の変化に最も影響を及ぼす劣化因子(例えば、錆、木材腐朽等)の抽出を行う。

4. 研究成果

主に「「実物大耐力試験」による風の動的作用を考慮した金属屋根の耐力評価および破損メカニズムの解明」により得られた成果を示す。

(試験体概要)

木造住宅の金属屋根を対象として、屋根葺き材の剥離の起点と考えられる軒先・ケラバを再現したアセンブリ試験体を使用し実物大変動風圧試験を行った。金属板の葺き方は、図2に示す横葺きと、図3に示す立平葺きの2種類である。試験体は、横葺き試験体が5体、立平葺き試験体が4体の合計9体である。いずれの試験体も、金属板は厚み0.4mmのGL鋼板である。葺き方は、横葺き試験体は2段式に加工された金属板を垂木の位置でビス留めし、金属板同士は嵌合させている。一方、立平葺き試験体では、金属板を部分吊子を用いて垂木の位置でビス留めし、隣り合う金属板の立ち上がり部は立てハゼとして接合されている。また、いずれの試験体でも金属板端部は、軒先とケラバの辺においては金属板を折り曲げて唐草に引っ掛けるように固定されている。これは実際の施工で一般的に用いられる方法である。



図2 横葺きアセンブリ試験体



図3 立平葺きアセンブリ試験体

(載荷方法)

本研究においては、実変動風荷重載荷装置として東北大学にて製作された3台の実変動風荷重載荷装置PLA(図4)を用いた。PLAによる実験は、圧力箱方式により実施しており、図5のように試験体を納めた圧力箱とPLAをホースで接続し、PLAにより吸引することで圧力箱内に負圧を生じさせ試験体に載荷する。図6は実験で用いた実変動風荷重時刻歴であり、低層建物を対象とした風洞実験により取得した。初めの時刻歴の設計風速は $V_f = 27.8\text{m/s}$ であるが、徐々に設計風速を上げて載荷を続けており、時刻歴の色の違いが設計風速の変化に対応している。PLAの追従性は圧力箱の容積に依存するが、本実験で使用した圧力箱においてはターゲットとする実変動風荷重時刻歴に対して高い追従性を有していることを確認している。また、本研究においては、図4の実変動風荷重時刻歴の載荷のほか、比較検討用に $\square 100\text{Pa/s}$ の漸増荷重の載荷も行った。



図4 PLA(東北大学)



図5 圧力箱

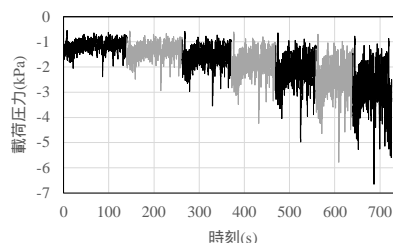


図6 実変動風荷重時刻歴

(実験結果)

各試験体の破壊荷重の統計値、破壊の様子を表1に示す。横葺き試験体の漸増荷重载荷においては、3体とも荷重-5.0~-6.0kPaの間で図7のような嵌合部が外れる破壊が生じた。一方、実変動風荷重を载荷した場合は、-5.0kPa程度のピーク荷重が繰り返し作用してもすぐに嵌合部外れは発生しなかった。試験体 No.4 については一度耐えた最大ピーク荷重よりも小さい荷重で嵌合部破壊が生じた。試験体 No.5 については、横葺き試験体5体の中で最も大きな負圧-6.34kPaが作用した際に嵌合部破壊が生じた。以上の結果から、実変動風荷重時刻歴を载荷した場合においては、大きなピーク風圧が作用することがあっても、その作用時間が短いため、継続的に作用する漸増荷重の場合より外装材の破壊荷重が高く評価されると考えられる。しかし、試験体 No.4 のように、一度耐えた荷重レベルよりも低い荷重で破壊に至る例もあり、繰り返し载荷によって嵌合部の状態が変化し、一度経験している高い荷重よりも低い荷重で破壊に至る可能性も示唆された。

立平葺き試験体は、载荷した負圧により金属板が上部に引っ張られることで膨れ上がり、図8のような塑性変形を生じた。载荷中に金属板同士の接合部である立てハゼ部が外れることはなく、横葺き試験体のような明確な破壊荷重の評価ができなかった。なお、横葺き試験体のように金属板の接合部が外れることがなかった要因としては、立てハゼ部が強固に接合されていることによるものと考えられる。よって、実験時の目視や、レーザー変位計により架台の下から測定した金属板の変位の様子から塑性化が開始したとみなされる荷重を破壊荷重とした。図9は漸増荷重を载荷した試験体 No.6 の荷重-中央部変位関係を示したものである。载荷圧力が-4.5kPa付近において変位の傾きの変化が見受けられるため、この付近で弾性域から塑性域に遷移したものと考えられる。よって、今回試験体として立平葺き試験体の破壊荷重は-4.0~-5.0kPa程度と推察される。载荷時の様子については、漸増荷重载荷時と実変動風荷重载荷時の間で大きな差異はなく、金属板の厚みや材料特性、留め付け条件などに依存するものと考えられる。また、横葺き試験体、立平葺き試験体の全てにおいて軒先・ケラバ部から剥離して破壊するという事はなかった。さらに、試験後に試験体を解体する過程で、野地板に金属板を固定するビスを確認したが、ビスが抜けるような変化は見られなかった。これは、ビスが垂木の位置で留め付けていたことにより、ビス抜けが生じにくかったものと考えられる。

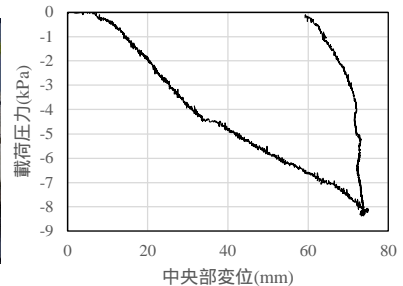
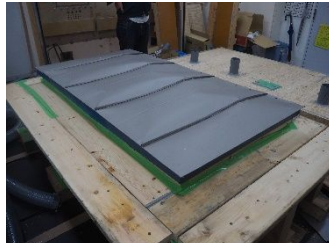
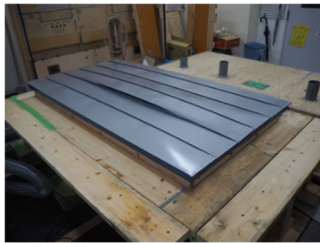


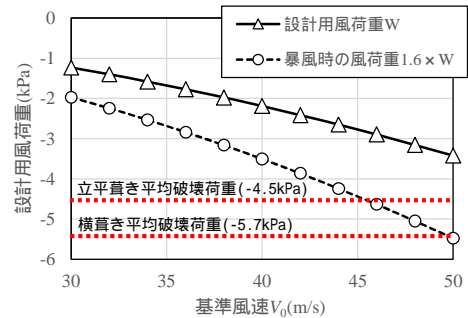
図7 横葺き試験体の破壊性状 図8 立平葺き試験体の破壊性状 図9 荷重-中央部変位関係 (試験体 No.6)

表1 各試験体の破壊荷重および破壊進行の特徴

No.	葺き方	荷重形式	破壊荷重 (kPa)	平均破壊荷重 (kPa)	変動係数	破壊の進行の特徴	
1	横葺き	漸増荷重	-5.64	-5.6	-5.7	0.086	-5.0kPa ~ -6.0kPa の間で嵌合部が外れる破壊が生じた。
2			-5.19				
3			-5.97				
4		実変動荷重	-5.24	-5.79			
5		-6.34					
6	立平葺き	漸増荷重	-4.0 ~ -5.0	-	-	金属板が膨れ上がり、塑性変形に至った。 左記破壊荷重の数値は目視と変位から塑性変形が開始した荷重 (-4.0kPa ~ -5.0kPa) を破壊荷重とした。端部や立てハゼ部が外れることはなかった。	
7		実変動荷重					
8							
9							

(告示値との比較)

本実験で想定した条件における屋根葺き材の設計用風荷重を、平成 12 年建設省告示第 1458 号に基づき計算し、本実験における結果との比較を行った。地表面粗度区分を と仮定し、屋根平均高さを風洞実験で対象とした切妻屋根建物の屋根平均高さより 6.5m として、基準風速を変化させた場合の設計用風荷重 W および限界耐力計算における極めて稀に発生する暴風時の風荷重 1.6W(安全限界に対応)を本研究における実験結果と比較したものを図 10 に示す。これより、設計用風荷重 W は実験で得られた破壊荷重よりも、全ての基準風速の範囲で下回っていることがわかる。稀な暴風時の風荷重 1.6W については、基準風速が 45m/s 以上になると立平葺きの平均破壊荷重が 1.6W を下回っている。しかし、本研究で対象としている金属屋根工法が木造住宅用として多く施工されるのは基準風速の比較的低い東北地方に多く、基準風速が高い地方では少ない。東北地方の基準風速の最大値は 36m/s であり、その風速における設計用風荷重と実験の平均破壊荷重を比較すると、立平葺きで 2.5 倍、横葺きで 3 倍程度となっている。一般に外装材メーカーで用いられる安全率は 1.5~3 程度であり、また、本実験結果の破壊荷重の変動係数(横葺き)は 0.086 と小さいことから、本研究で扱った金属屋根の屋根葺き工法は、本実験での仕様・載荷条件においては、安全上適切な耐風性能を有していると評価できる。



(結論)

本研究のフェーズ「実物大耐力試験」による風の動的作用を考慮した金属屋根の耐力評価および破損メカニズムの解明においては、PLA を用いて金属屋根葺き材を施工した屋根アセンブリ試験体に対して漸増荷重並びに突変動風荷重載荷実験を行い、動的荷重と静的荷重を作用させた場合の金属屋根の挙動や破壊性状の違い、及び金属屋根の葺き方の違いによる破壊形態の違いについて検討した。また、破壊荷重について建設省告示第 1458 号に示される設計用風荷重との比較を行い、以下の知見を得た。

- 1) 金属板を横葺きとして屋根に葺いたケースの実験においては、全ての試験体で -5.0 ~ -6.0kPa 程度の荷重が作用した際に金属板同士の嵌合部が外れる破壊が生じた。
- 2) 金属板を立平葺きとして屋根に葺いたケースの実験においては、金属板が塑性変形する破壊性状が全ての試験体において見られた。目視と変位測定の結果より -4.0 ~ -5.0kPa で塑性化が始まっているものと推察される。
- 3) 突変動風荷重を載荷した場合と漸増荷重を載荷した場合の挙動の違いについては、突変動風荷重を載荷した場合には継続的に作用する漸増荷重の場合より外装材の破壊荷重が高く評価される可能性が示唆された。
- 4) 金属屋根葺き材の破壊のメカニズムとしては、「嵌合部の外れ」や「金属板が長尺であることに起因した浮き上がりとそれに伴う塑性変形」が起点として考えられる。
- 5) 建設省告示による設計用風荷重値と本実験で得られた破壊荷重を比較すると、住宅用の屋根として金属屋根葺き材が比較的多く使用される地域(東北地方等)においては、破壊荷重が設計用風荷重をかなり上回っている。限界耐力計算における安全限界に対する風荷重(極めて稀に発生する暴風時の風荷重)と比較した場合においても、設計用風荷重は本実験で得られた破壊荷重を下回るため、本研究で扱った金属屋根の屋根葺き工法は、本実験での仕様・載荷条件においては、安全上適切な耐風性能を有していると評価できる。

以上の成果より、本研究の目的である「(1)動的荷重効果を考慮した実物大耐力実験による屋根部の破損メカニズムの解明および耐力情報の拡充」は達成されたと言える。

また、今後の課題として経年劣化、施工状態等の実況に応じた耐力評価の必要性があると考えられ、それらは実地調査等を行いながら、実際の住宅における屋根の性能劣化の状況や施工状態を整理し、それらの状況に応じた耐風性能の低下や破壊性状の変化について指標を設ける必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 今野大輔, 植松康	4. 巻 26
2. 論文標題 実変動風荷重載荷実験に基づく金属屋根の耐風性能に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 風工学研究論文集	6. 最初と最後の頁 297-304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今野大輔, 植松康
2. 発表標題 実変動風荷重載荷実験に基づく金属屋根葺き材の耐風性能に関する研究
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------