

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：51101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15009

研究課題名（和文）経年劣化の影響を考慮した木造住宅屋根部の強風災害危険度評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of a risk assessment method for damage of the roof of a wooden house considering the effects of aging

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） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強風災害時の建物被害の低減を目的として、屋根ふき材や窓ガラスといった建物外装材の耐力情報の拡充を行った対象としたのは窓ガラスであり、建築に一般的に利用されるフロート板ガラスの経年劣化による耐力低下の評価を行うため、「(1)既存建物から取り出した窓ガラスの破壊実験」および「(2)圧力載荷を行った窓ガラスの破壊実験」を実施した。

(1)の実験においては、長期間供用された窓ガラスは新品のものと比較して80%程度が耐力が低下していることが明らかとなった。

(2)の実験においては、任意の圧力載荷により耐力低下現象を確認できなかったが、載荷時間が耐力低下に及ぼす影響に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、台風や竜巻といった強風災害による建物被害の低減に寄与することができると思われる。

一般に、強風時の建物破壊のメカニズムとしては、窓ガラスのような開口部が強風や飛来物によって破壊され、そこから強風が吹きこむことにより建物全体の被害に繋がるとされているため、被害の起点である窓ガラスの耐力評価を行うことは被害低減に向けて重要である。

また、過去にあまり例を見ない経年劣化による窓ガラスの強度低下を確認できたことの意義は大きく、既存の建物の改修や修繕、開口部の保護などを促進する上で重要な知見であるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we expanded the strength information of building exterior materials such as roofing materials and window glass with the aim of reducing damage to buildings in the event of high wind disasters. In order to evaluate the strength reduction of float glass, which is commonly used in buildings, by aging, we conducted (1) breakage experiments of window glass taken from existing buildings and (2) breakage experiments of window glass loaded pressure. In the experiment (1), it was found that the strength of window glass that had been used for a long period of time was reduced by up to 80% compared to that of new glass. In the experiment (2), the strength reduction phenomenon could not be confirmed by arbitrary pressure loading, but the influence of loading time on the strength reduction was obtained.

研究分野：建築構造学，風工学

キーワード：強風災害リスク評価 実物大動風圧試験 窓ガラス 外装材 耐風設計 リング曲げ試験

1. 研究開始当初の背景

台風や竜巻等の強風時には、窓ガラスや屋根ふき材といった建物の外装材が被害を受けることが多い。2019年に発生した台風15号や19号の被害においてもそのような被害が多くみられ特に低層住宅が多く被害を受けた。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。そのような屋根部被害の低減を目的として、近年では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。

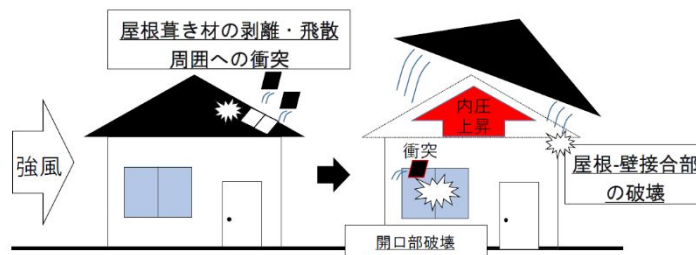


図1 強風による連鎖的被害のイメージ

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。

2. 研究の目的

本研究では、「強風災害時の建物被害の低減を目的とした強風災害リスク評価手法の開発」を目的としている。図1に示すように強風災害時の建物破壊の起点の1つとして窓ガラスが挙げられるため、本研究では特に窓ガラスに着目した。

強風災害リスク評価を行う上では、建物の耐力情報が必要不可欠であるため、「(1)動的荷重効果を考慮した実物大耐力実験による外装材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(窓ガラス)を用いた実験に基づく経年劣化の影響の把握」を目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

(1)の実験は、実変動風圧载荷装置(図2)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り、独自性の高い実験結果が得られると言える。本研究では本装置を用い、新品の板ガラスに対して任意の圧力を载荷することで人為的に経年劣化を再現し、荷重载荷時間が板ガラスの強度低下に及ぼす影響の評価を試みた。



図2 実変動風圧载荷装置 (東北大学所有)

(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、窓ガラスといった外装材を取り出し、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。本研究では、解体される既存建物から窓ガラスを取り出すことができたため、その窓ガラスを試験体として、経年劣化が強度低下に及ぼす影響の把握を試みた。また、本実験結果から得られた強度の統計値を用いて、窓ガラスの破壊風圧を予測する数値シミュレーションを行い、窓ガラスが経年劣化することにより破壊に至る風速の試算を行った。

本報告では、(2)の実験および数値シミュレーションの結果について報告する。

4. 研究成果

現行の窓ガラスの耐風性能評価に用いるガラスの許容耐力 p は、平成 12 年建設省告示第 1458 号より、次式で表せる。

$$p = \frac{300 \cdot k_1 \cdot k_2}{A} \cdot \left(t + \frac{t^2}{4} \right) \quad (1)$$

ここで、 k_1, k_2 ：ガラスの種類・構成に基づく係数、 A ：ガラスの見付面積、 t ：ガラスの厚みである。この式は、限定的な寸法のガラスを対象とした実験に基づく経験式であり、アスペクト比を無視し、面積に対する一律な反比例関係であることや、経年劣化の影響が適切に考慮されていないなどの問題が指摘されている。前述のことを踏まえて、経年劣化が窓ガラスの耐風性能に及ぼす影響について着目するため、本研究では、既存の建物から取り出した窓ガラスを試験体とした耐力評価試験を行い、劣化した窓ガラスの耐力データを取得し、新品の窓ガラスの強度との比較を行った。また、当該実験の結果を数値シミュレーションの入力値として用い、破壊に至る風速の試算および現行設計式の妥当性評価を行った。

【取り出した窓ガラスを試験体とした破壊実験による残存耐力の評価】

本研究では、3 階建て RC 造の学生寮(築 48 年)で用いられていた引違いアルミサッシから板ガラスを学生寮改修工事の際に取り出した。そして、図 3 のように 1 枚の板ガラスから 240mm 角の正方形を 9 枚切り出したものを試験体として、リング曲げ試験を行った。試験体数は計 240 枚である(内、有効試験体は 194 枚)。

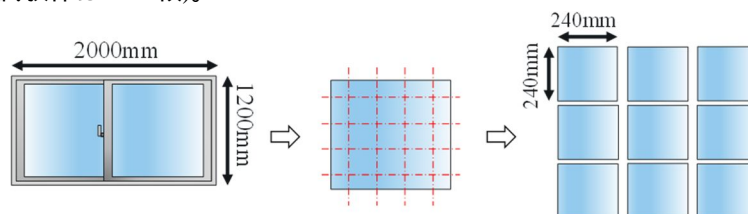


図 3 試験体作成の手順

リング曲げ試験とは支持リングの上に試験体の板ガラスを乗せ、その支持リングと同軸上にある負荷リングにより、漸増荷重を加えて板ガラスを押しながら板ガラスを破壊させる試験である(図 4)。このような負荷方法を取ることにより、負荷リング内での板ガラス表面には半径方向にも円周方向にも一様な応力度が生じさせることができるので、応力集中などといった偏りのない信頼できる応力値を求めることができる。実験は、 $\phi 14\text{mm}$ の負荷リングと $\phi 120\text{mm}$ の支持リングの間に試験体の窓ガラスを設置し、圧縮試験機で荷重をかけ、鉄板下のロードセルで破壊荷重を測定した。

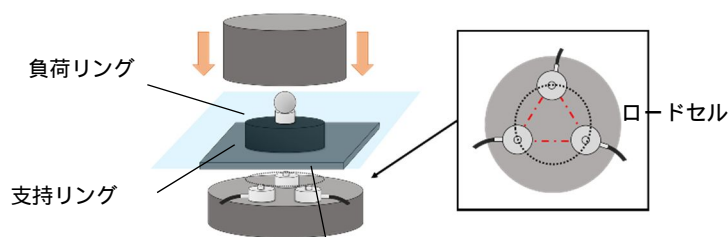


図 4 リング曲げ試験概要図

リング曲げ試験の実験結果から破壊荷重(残存強度)に対してワイブル解析を行い、表 1 の通り残存強度の尺度母数 S_{i0} 、残存強度の形状母数 m の 2 つのワイブルパラメータを算出した。

表 1 リング曲げ試験により得られた残存強度に関するワイブルパラメータ

| 階数 | 有効試験体数 | 平均破壊荷重 | 変動係数 | $S_{i0}(1\text{m}^2)$ | m |
|----|--------|--------|------|-----------------------|------|
| | | (kN) | | (MPa) | (-) |
| 1 | 73 | 0.829 | 0.27 | 16.3 | 3.29 |
| 2 | 62 | 1.453 | 0.28 | 34.4 | 3.37 |
| 3 | 59 | 1.654 | 0.30 | 30.5 | 2.86 |
| 全体 | 194 | 1.279 | 0.41 | 9.01 | 2.07 |

表1より1階から3階の残存強度 S_{i0} を比較すると1階が最もガラス耐力が低いが、全体を合めると有効試験体全ての結果から導き出した全体の残存強度 S_{i0} が最も低い。3階は試験体数の枚数が少なく、平均破壊荷重が最も大きい。残存強度 S_{i0} は2階の残存強度 S_{i0} より低い。2階は3階と比較してワイブル形状母数 m が小さいため強度のばらつきが2階より大きい。そのため2階全体として残存強度 S_{i0} を算出すると値の変化が少なく、3階よりも安定した残存強度を保持していたと考えられる。次に残存強度 S_{i0} のみを見ると、1階が最もガラス耐力が小さいことが分かる。一般的に、上階に行くほど受ける風圧の影響は大きいため、窓ガラスの劣化具合も大きいと考えられるが、1階部分は人や車の往来による砂埃などの影響も強いと考えられる。

続いて、表1で示した本研究の実験で得られた既存建物から取り出したガラスの残存強度と、既往研究で行われた新品ガラスの窓ガラスを用いたリング曲げ試験の結果との比較を表2に示す。本研究の結果は、新品ガラスの強度を比較して約80%が低下しており、経年劣化が窓ガラスの耐風性能に及ぼす影響が顕著であることが示唆された。

表2 新品のガラス強度との比較

| | 表面状態 | 応力速度 σ | 試験体数 | $S_{i0}(1m^2)$ | m |
|--------------------------|------|---------------|------|----------------|------|
| | | (MPa/s) | | (MPa) | (-) |
| 本研究 | 屋外 | 2.0 | 194 | 9.01 | 2.07 |
| ガヴァンスキ ⁽¹⁾ | New | 2.0 | 22 | 67.7 | 4.88 |
| 川端 ⁽²⁾ | New | 1.4 | ~70 | 58.7 | 5.29 |
| | New | 1.2 | ~70 | 68.9 | 5.71 |
| Haldimann ⁽³⁾ | New | 21.6 | 10 | 68.3 | 7.20 |

【数値シミュレーションによる破壊風速の評価、現行式の妥当性検証】

本節では、経年劣化した窓ガラスのリング曲げ試験で得られた結果を入力データとして、疲労を考慮した数値計算により破壊風圧を推定し、告示値と比較して耐風性能評価の妥当性を評価した結果について報告する。

本研究で用いる数値計算の軸となる载荷時間に応じてガラス強度が変化することを表現した式は以下で表される。この式の中には疲労の理論式である式(3)が含まれている⁽⁴⁾。

$$S(t) = \left[\left(S_i \frac{K_{IC}}{K_{II}} \right)^{n-2} - \frac{n-2}{2} AY^2 K_{IC}^{n-2} \int_0^t \sigma^n(t) dt \right]^{\frac{1}{n-2}} \quad (2)$$

$$DA_{cr} = \int_0^{t_f} [\sigma(t)]^n dt \quad (3)$$

ここで、式(2)の S_i はガラスの初期強度、 K_{IC} は破壊靱性値(=0.75)、 K_{II} は応力拡大係数の初期値(=0.55)、 Y は幾何学的形状係数(=1.12)、 $\sigma(t)$ は時刻(t)におけるクラック先端の応力、 A と n はクラックの成長速度に関する係数($A=1.08$, $n=16$)である。式(3)の DA_{cr} は疲労蓄積、 t_f は破壊時刻、 $\sigma(t)$ は時刻(t)における応力である。また、数値計算の入力データである m は初期強度 S_i に関するワイブル分布の形状パラメータであり、リング曲げ試験の結果より求めた。数値計算上におけるガラスの破壊は、ある時刻 t における残存強度 $S(t)$ がその時刻に生じている応力 $\sigma(t)$ を下回ったときに生じると定義する。

本研究のリング曲げ試験で得られた残存強度に関するパラメータに加え、既往研究で得られた新品のガラスのパラメータ⁽¹⁾を入力データとして数値計算を行った結果と平均破壊風圧を表3に示す。表の数値計算結果は、現行の告示値との比較を行うために、数値計算を各10,000回行った結果から、破壊確率1/1000に相当する破壊風圧を抽出し、評価時間6秒の定荷重に変換した値を示している。本計算は面積1m²、厚さ3mmの板ガラスに対する比較を行った結果である。

表3 数値シミュレーション結果

| | 採取 場所 | 数値計算 入力パラメータ | | 数値計算結果 (破壊確率 1/1000) | | | | |
|-----------------------|----------|-----------------|----------|-------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|-------|
| | | S_i (MPa) | m (-) | 破壊風圧 最大値 (kPa) | 破壊風圧 最小値 (kPa) | 平均破壊 風圧 (kPa) | 等価定荷重 (6秒) (kPa) | |
| | | 告示第 1458 号 | - | - | - | - | - | 1.575 |
| 本研究 | 1 階 | 学生 | 16.2 | 3.28 | 4.150 | 0.100 | 1.802 | 0.151 |
| | 2 階 | 寮 | 34.3 | 3.37 | 8.950 | 0.150 | 3.891 | 0.525 |
| | 3 階 | | 30.5 | 2.86 | 10.23 | 0.100 | 3.584 | 0.211 |
| ガヴァンスキ ⁽¹⁾ | 新品 | | 67.7 | 4.88 | 12.28 | 1.050 | 6.836 | 1.725 |

表3より、告示値を上回っているのは新品のガラスの初期強度であるガヴァンスキ(1)のみである。経年劣化したガラスを対象とした本研究と出町⁶⁾は告示値を下回っている。この結果より、本研究の条件下においては、経年劣化により耐力が低下した窓ガラスは、現行の耐風性能評価では安全に評価できない可能性が示唆された。

【引用文献】

- (1)ガヴァンスキ 江梨, 今野大輔, 植松康: 経年劣化した板ガラス初期強度の算定, 平成 25 年度日本風工学年次研究発表会, 2013.
- (2)川端三郎: 外装用板ガラスの耐風設計に関する研究, 東北大学博士論文, 1996.
- (3)M.Haldimann: Fractures strength of structural glass elements-analytical and numerical modeling, testing and design, Ph. D. , 2006.
- (4) Simiu, E., and Reed, D.A. : Probabilistic design of cladding glass subjected to wind loads. , 4th Int. Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Universita di Firenze, Italy , 1983.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤沢采可, 粒来桃子, 今野大輔 |
| 2. 発表標題 経年劣化した窓ガラスの耐風性能評価に関する研究 (その 1) リング曲げ試験に基づく窓ガラスの残存強度の評価. |
| 3. 学会等名 日本建築学会東北支部 第85回支部研究報告会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 粒来桃子, 藤沢采可, 今野大輔 |
| 2. 発表標題 経年劣化した窓ガラスの耐風性能評価に関する研究 (その 2) 数値計算に基づく破壊風圧の評価 |
| 3. 学会等名 日本建築学会東北支部 第85回支部研究報告会 |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------|
|---------|---------|