

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820234

研究課題名(和文) 建築用ガラスの安全性検証法の確立のための基礎的研究

研究課題名(英文) Verification of the Safety of Annealed Glass

研究代表者

宮里 直也 (MIYASATO, Naoya)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10513997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ガラス材料は構造部材としての指定建築材料に告示で明記されておらず、建築基準法上は非構造部材として扱われ、設計用許容応力度(F値)が設定されていない。また唯一の告示式は、辺長比が考慮されていないことや約50年以上前の実験のため、試験体の板ガラスが、現在主流であるフロート板ガラスでなく、普通板ガラスを用いた実験である、安全率の考え方が不明な式である、現在使われているディテールを反映されていない等の問題がある。以上を踏まえ、フロート板ガラスを用い風荷重時の板ガラスの破壊荷重及び破壊性状の把握を目的として辺長比をパラメータとした耐風圧試験を行った。

研究成果の概要(英文)：Glass is treated as a non-structural element in the Building Standards Code for Japan. Furthermore, allowable stress of the glass is not set. Formal, public building codes and guidelines are inadequate and out of date, specifically there are the following issues: 1. The aspect ratio is not considered. 2. The experiments regarding current codes were performed more than 50 years ago. Therefore, sheet glass was used, not the annealed glass which is mainstream now. 3. The safety factors are unknown. 4. Used boundary details have not been considered. Based on the above situation, a wind pressure examination was performed that assumed aspect ratio as a parameter for the purpose of understanding destruction load and destruction properties under wind load using annealed glass.

研究分野：建築構造

キーワード：フロート板ガラス 耐風試験 辺長比 破壊確率 ワイブル分布 正規分布

## 1. 研究開始当初の背景

ガラスは、外装材として殆どすべての建築で使用される必要不可欠な材料である。ガラスを建築物で用いる場合、建築躯体やガラスを支える支持架構の変形時に、ガラスに応力を発生させないことを原則とし設計を行う。しかし、東日本大震災の被害事例（例えば、郡山市の体育館・仙台空港など多数の被害報告あり）から露見したように、二次部材（外装材）として設計されたガラスが破損し、避難時の二次被害の発生や、避難施設としての建物機能の損失が生じるなど、大きな課題が浮かび上がった。しかし現状では、ガラス材料は構造部材としての指定建築材料に告示で明記されておらず、建築基準法上は非構造部材として扱われ、設計用許容応力度（F 値）が設定されていない。各種外力によりガラスに生じた応力については、後述する4辺支持ガラスのみ告示式が定められている以外は、明確な設計方法や根拠等は存在しておらず、国内大手数社の板硝子メーカーが設立した板硝子協会の推奨基準や各メーカーカタログの付録資料をもとに設計（短期許容応力が記載されているが、その根拠となる実験データなどは一切公開されていない）を行っている。つまり、その性能及び安全性は、メーカー任せであることは否めず、設計者として客観的に検証するデータが公開されておらず、構造設計者が工学的にディテールなども含めて、安全性や設計責任について積極的に関わることができず、ガラスに関する設計方法や資料が整備されていない曖昧な状況となっている。また唯一の告示（平12 建告1458）式（4 辺がアルミ枠などにはめ込まれて支持される4 辺単純支持のみが対象）は、①ガラスの面積（ $m^2$ ）、②厚さ（mm）、③ガラスの種類（強化ガラス、倍強化ガラスなど）から決まる強度係数、④ガラスの構成（単板、合わせ、複層ガラスなど）に応じて定められる構成係数、の4つの情報のみにより板ガラスの面外

荷重に対する許容耐力（ $N/m^2$ ）が算出される。そのため、辺長比（縦と横の長さの比率、辺長比）の違いは風荷重などの外力が加わった際の力の伝達方法に大きく関連する項目であるにも関わらず、長辺と短辺長さが異なるケースでも許容耐力が同じ結果となってしまう、近年のガラスファサードの多様なデザインや実際に使われているガラスの形状・サイズに適用するには問題があると考えられる。

また、この式は三好俊二氏の「ガラス板の耐風圧試験」日本建築学会論文報告集第100号、1964年がベースと言われている。今から約50年以上前の実験のため、試験体の板ガラスが、現在主流であるフロート板ガラスでなく、普通板ガラスを用いた実験であり、膨大な実験結果から式を導く過程及び告示化される過程での安全率の考え方が不明確な式である、等の問題がある。またガラスの支持方法もパラメータとなっておらず、現在使われているディテールを反映しきれていない。さらにガラス材料は、工業製品でありながら機械的性質のばらつきが鋼材に比べると大きく、また降伏後の歪み硬化がない脆性材料である等の特殊性がある。これらの点も勘案したガラスの破損に関する安全性の検証法や設計方法の確立が急務である。なお、上記のような視点に立った学術的な研究例は、国内ではほとんど報告されていない。

## 2. 研究の目的

震災で数多くの被害が生じた非構造部材（仕上げ材）として扱われているガラスを研究対象とする。ガラスは、建築基準法において許容応力度（F 値）が定められていない材料であり、破損などに対する安全性を検証するための手法は未確立である。近年、ガラスの普及はめざましく、様々な事例がみられるが、それらに対して地震や風荷重等の外力が作用した際のガラスの破損に対する安全性の検証、及び設計手法の確立を目指して、そ

れに必要な客観的な資料、データ等の整備を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究で対象とするガラスは、フロートガラスとし、はじめにガラスの使われ方の事例調査を行い、ガラスと荷重条件(外乱)との関係からガラスに求められる安全性の要求項目を分析・整理した。さらに既往の研究成果も踏まえガラスの材料試験のパラメータと試験計画について検討し、板ガラスに対する面外載荷実験を実施した。

### 4. 研究成果

まず、ガラスに関する技術的、社会的な事例調査や事故事例を通じた現状把握、及び建物におけるガラスの実際の使用方法と想定される荷重に関する分析、整理について研究を進めた。具体的にはガラスの事例調査を行った。これは、その後のガラスの破壊実験の試験体サイズについて検討、絞り込みを行うための基礎データの収集として実施したものである。実施内容は、実在する建物で使われている建築用板ガラスについて、その辺長比を調査対象として、建築用板ガラスの支持方法が異なる3種類(点支持構法2種類、及び最も一般的に使用されている4辺支持構法)を設定した。統計調査に用いたデータ数は、4辺支持構法に関しては、調査対象地域を都内とし、ビル建築に限定し100データ、点支持構法に関しては、都内では対象となる物件数が少ないため、全国より異なる2種類の形式を50データずつ、全200データとし、実地調査及び文献等による調査を行った。統計調査の結果、それぞれの支持方法において、建築用板ガラスの使用事例が多い辺長比を具体的に絞り込むためのデータを取得することができた。

以上の結果を踏まえて、ガラスの材料試験に関して具体的な試験項目・方法を決定した。

### (1) 耐風圧実験概要

本実験は風荷重時の板ガラスの破壊荷重及び破壊性状の把握を目的として行った。実験写真を図1に示す。試験体は、短辺を540mm(支持間隔500mm)で一定とし、長辺の長さをパラメータとして、540mm(支持間隔500mm, 辺長比1:1)、790mm(支持間隔750mm, 辺長比1:1.5)、1040mm(支持間隔1000mm, 辺長比1:2)の3種類とし、それぞれ板厚3mmのフロート板ガラスを用いた。なお、試験における安全性を考慮し、飛散防止フィルムを上面(圧縮側)に貼付した。試験環境は、室温、大気中とし、試験ごとに温度(平均22°C)・湿度(平均55%)の測定を行なった。荷重は、吸引機能を持つ送風機を用いて、治具内部の空気を吸引し負圧にすることで、板ガラスに面圧を加えた。治具内部の圧力は圧力計を用いて測定した。境界条件はサッシを模擬した四辺単純支持とした。なお、パラメータ毎に100体、合計300体について試験を行なった。

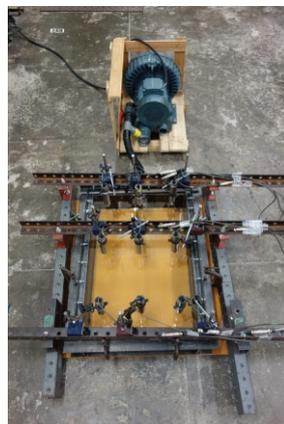


図1 実験写真

### (2) 耐風圧実験結果及び考察

#### ①破壊荷重に関する考察

全試験体を対象として破壊荷重毎の破壊枚数の度数分布を図2に示す。パラメータ毎に破壊荷重の標準偏差を比較すると、辺長比1:1(標準偏差 4,473) > 1:1.5(同 3,445) > 1:2(同 2,671)という関係性が得られ、辺長比が大きくなると、破壊荷重Wのばらつきが小さくなることが把握された。なお、辺長比に関わらず破壊荷重Wに比較的大きなばらつき

が生じているが、これは板ガラスの製作時にエッジ部分に形成される傷に加え、グリフスフロー（板ガラス表面にある微細な亀裂）が要因として考えられる。

次に告示式より算出した許容耐力と実験で得られた破壊荷重の最小値を比較する。図2より、全試験体において実験で得られた破壊荷重  $W$  は告示式を上回る結果となった。以上より、本実験数においては安全側を示したが、実験結果のばらつきが大きいことから危険側に評価される可能性も示唆された。

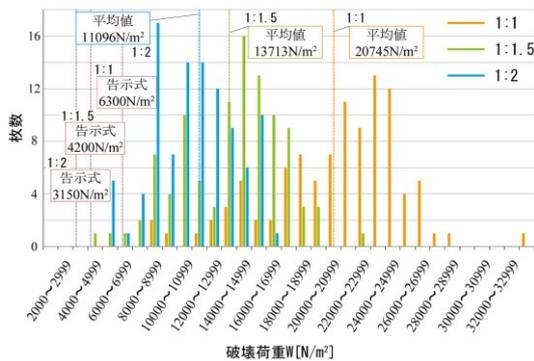


図2 破壊荷重の分布

②確率分布の適合性の検討

現状の板ガラスの設計は、通常メーカーが推奨する許容応力度に基いて実施されている。この許容値は、ガラスの破壊分布が対数正規分布で評価可能との仮定下で、設定破壊確率（例：短期許容応力度では1/1000）に相当する応力度から設定されたものである。しかし、ガラス特有の脆性破壊性状（無数に存在する欠陥の内の最弱のものが起点となり亀裂成長する破壊性状）には、ワイブル分布の適用性が高いと考えられる。以上の観点から、破壊試験結果に基き確率分布の適合性の検討を行うと共に、得られた確率分布から許容耐力（許容耐風圧）を求め、既往の許容値の妥当性の検証を行う。

破壊試験で得られた破壊確率  $F(W)$  - 破壊荷  $W$  関係に対する対数正規分布及びワイブル分布を図3に、残差平方和（統計分布の適合性検定結果）を表1に示す。

なお、統計分布における実測値は、少数試験

片（100体以下）について信頼性が期待されるメジアンランク法によって処理した破壊強度値をプロットした。

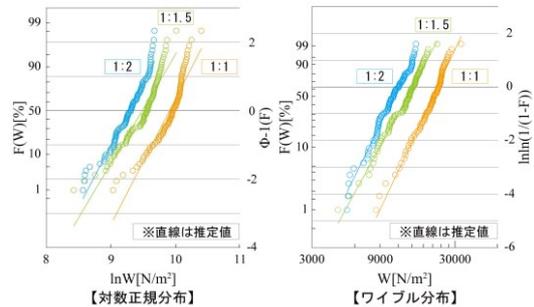


図3 破壊確率  $F(W)$  - 破壊荷重  $W$  関係

表1 残差平方和の比較

辺長比	対数正規分布	ワイブル分布
1:1	10.157	3.057
1:1.5	8.223	2.282
1:2	4.087	2.420

表2 破壊確率0.1%時の破壊荷重と許容耐力の比較 (kN/m²)

辺長比	告示式による許容耐力	対数正規分布	ワイブル分布
1:1	6300	8200	5600
1:1.5	4200	5000	2900
1:2	3150	4600	2800

表1より、全ての辺長比において、ワイブル分布の残差平方和が対数正規分布に比べ小さくなることが把握された。これよりワイブル分布は、対数正規分布に比べて推定精度が高く、板ガラスの破壊に対する適用性の高さが示唆された。

また、図3より求めた破壊確率0.1%時の破壊荷重と告示式より算出した許容耐力（耐風圧）の比較を表2に示す。メーカーの推奨値に相当する対数正規分布の値は、辺長比に関わらず告示の許容耐力を上回っている。一方、ワイブル分布から求めた値は、告示式の約70~90%の大きさであり、告示式は10~40%の範囲で危険側となる可能性が示唆された。

③破壊起点位置及び破壊荷重

板ガラスは、板ガラス内のある点からひび割れが発生し、板ガラス全面に細かいひびが広がっていくことで破壊に至る。そこで、試験結果より各試験体のひび割れの起点を把握し、破壊モードと破壊荷重の関係について

考察する。破壊起点(ひび割れの起点)の定義を図4に示す。

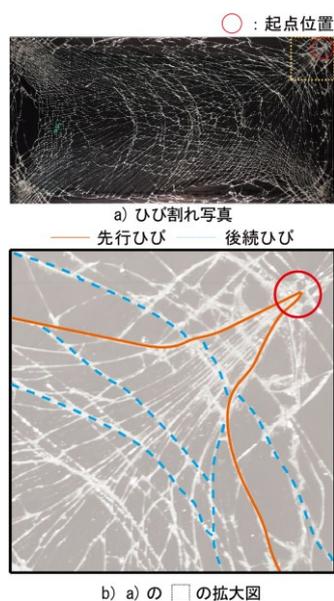


図4 破壊起点の定義

板ガラスのひびは、先行して発生したひびによって後続するひびが分断される。このことから、ひび同士の交点で先行ひび割れを判断し、追跡することで先行ひび割れが密集する点を破壊の起点と定めた。

起点位置及び破壊荷重を図5に、辺長比による起点位置の比較を表3にそれぞれ示す。辺長比に関わらず、破壊荷重が大きな場合、起点の位置は板ガラスの外周近傍に分布し、破壊荷重が小さいほど板ガラス中央部に分布する傾向が把握された。また、辺長比によらず、起点は全体的に対角線上に分布する傾向が得られた。特に辺長比 1:1.5、1:2 では、前述の傾向が顕著に現れている。

#### ④ひび割れ発生状況の分析

試験体のひび割れの発生状況を見ると、破壊荷重が小さい場合においては中央部に亀裂が生じ、破壊荷重が大きい場合においてはエッジから亀裂が生じることが把握された。中央部に起点が生じた場合、辺長比に関わらず、ひび割れは起点を中心に四隅に向かって進行していく傾向が観察された。辺長比 1:1 では、起点が外周近傍に生じた場合も同様の傾向を示した。一方、辺長比 1:1.5 及び 1:2

では、起点が外周近傍に生じた場合、ひび割れは起点を中心に四隅に向かって進行していくと共に、短辺に並行なひび割れが数本入る傾向を示した。破壊荷重が小さい場合は、ひび割れの進行が比較的遅く、また本数が少なく、粗いひびが発生することが確認された。一方、破壊荷重が大きい場合は、ひび割れの進行が速く、また本数が多く、細かいひび割れが発生することが確認された。以上の結果より、板ガラスの中央部が起点となる場合、板ガラス内部に存在する微小な亀裂が原因となり小さな荷重で破壊が生じたと考えられる。一方、ガラス内部の亀裂が起点にならない場合には、破壊は外周近傍に生じると共に、破壊荷重が大きくなる性状が把握された。

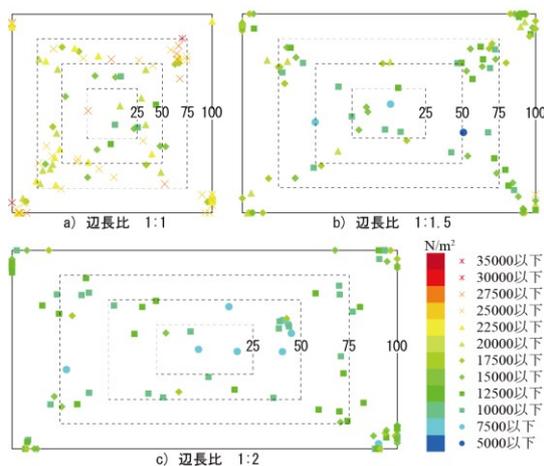


図5 起点位置及び破壊荷重

表3 辺長比による起点位置の比較

割合(%)	辺長比 1:1	辺長比 1:1.5	辺長比 1:2
0~25%	4	6	4
25~50%	18	6	19
50~75%	41	33	17
75~100%	37	55	60

※ %は外枠に対する割合

#### (3) まとめ

本研究では風荷重時を想定した板ガラスの耐風圧試験を通して、以下の知見が得られた。

- ①板ガラスの破壊確率はワイブル分布により良好に評価できると考えられる。
- ②ガラスの耐風設計に通常用いられている破壊確率(1/1000)を満足するためには、現状の告示で提示されている値は、10~40%の範囲で危険側となる可能性が示唆された。

③板ガラスの破壊の起点は、破壊荷重が大きいほど、板ガラスの外周近傍に分布し、破壊荷重が小さいほど板ガラスの中央部に分布する傾向が把握された。

④ひび割れの性状は、破壊荷重が小さい場合は比較的粗いひび割れが生じ、大きい場合は細かいひび割れが多くひび割れの進行が速い。

本研究では、厚さ 3mm、4 辺支持のみの実験を実施した。今後、厚さ、境界条件を変更した実験を行う必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

①村田雅也、岡田章、宮里直也、廣石秀造、建築用板ガラスの耐風圧強度に関する研究告示式の妥当性の検証と破壊モードの分析、日本建築学会、2016 年 3 月 1 日、日本大学(東京都・千代田区)

②篠峻太郎、岡田章、宮里直也、廣石秀造、プレストレスを利用したガラス構造の適用性に関する研究 アーチ形状架構への適用と基本的構造特性の把握、日本建築学会、2016 年 3 月 1 日、日本大学(東京都・千代田区)

③村田雅也、岡田章、宮里直也、廣石秀造、小林紘子、アウトースキンに多孔板を用いたダブルスキンファサードに関する基礎的研究(その 1) インナースキンに作用する平均風圧係数の把握、日本建築学会、2015 年 9 月 6 日、東海大学(神奈川県・平塚市)

④小林紘子、岡田章、宮里直也、廣石秀造、村田雅也、アウトースキンに多孔板を用いたダブルスキンファサードに関する基礎的研究(その 2) インナースキンに作用する変動風圧特性の把握とピーク風力係数の導出、日本建築学会、2015 年 9 月 6 日、東海大学(神

奈川県・平塚市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮里 直也 (MIYASATO, Naoya)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：10513997