

変動風圧載荷実験に基づく建築用窓ガラスの疲労による 経年劣化予測手法の開発

八戸工業高等専門学校 産業システム工学科 今野大輔

Development of a Method for Predicting Aging of Window Glass Based on Dynamic Wind Pressure Loading Experiments

Daisuke Konno

National Institute of Technology (KOSSEN), Hachinohe College

建築に用いられる窓ガラスは長期間の供用により強度が低下していることが知られている。本研究では風圧力がガラス強度に及ぼす影響を検討するために、実変動風荷重載荷装置を用いて任意の風圧をフロート板ガラスに載荷することで、静的疲労による劣化が生じた状態を模擬した試験片を作成し、リング曲げ試験により残存強度を測定した。今回の実験結果からは明確な強度低下が見られなかったが、数値計算により載荷時間が強度低下に与える影響について検討を行った。

It is known that the strength of window glass used in building reduces over long periods of service. In this study, in order to investigate the effect of wind pressure on glass strength, specimens were prepared by applying arbitrary wind pressure to float glass using an actual variable wind load apparatus to simulate the state of deterioration caused by static fatigue, and the residual strength was measured by a ring bending test. Although no clear reduction in strength was observed from the experimental results, the effect of loading time on the reduction in strength was investigated by numerical calculations.

1. はじめに

強風災害時には、窓ガラスなどの開口部の被害が多く生じる。窓ガラスが割れると強風が吹き込むことにより、建物内の圧力が上がり屋根全体が持ち上げられ吹き飛ばされるなど、被害が連鎖的に生じる恐れがあり、甚大な被害の起点となることが多い。窓ガラスは、強風による飛散物が窓ガラスに衝突することで破損することが多いが、風圧で破壊する事例も少なくない。中には、設計風速以下の風速時に破損している事例も見られ、窓ガラスの耐力が経年劣化により低下している可能性が考えられる。

わが国で現在用いられている窓ガラスの耐風性能評価は、建設省告示 1458 号に示されるが、当該告示式は、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るために、様々な寸法条件や温熱環境下において適用できるとは言い難い。さらに、経年劣化の影響を適切に考慮しておらず、老朽化した住宅の窓ガラスの耐風性能を評価することも難しい。

筆者らは過去に窓ガラスの経年劣化が強度に与える影響を把握することを目的として、既存の建物から取り出した窓ガラスを試験体として、リング曲げ試験により残存強度測定

試験を行った^{1),2),3)}。その結果、長期間供用された建物の窓ガラスの強度は、既往の研究^{3),4),5)}で測定された未使用の窓ガラス強度に比べて80%程度低下していることを示した(表1)。

表1 フロート板ガラスの強度に関する既往の実験結果

	表面状態	用途・年数	応力速度 [MPa/s]	S_{i0} [MPa]	m
藤沢 ¹⁾	屋外暴露	学生寮 (48年)	2.0	9.0	2.07
出町 ²⁾	屋外暴露	住宅 (30年)	2.0	14.7	2.44
ガヴァンスキ ³⁾	屋外暴露	学校校舎 (10年)	2.0	6.1	4.88
	未使用	—	1.9	67.7	1.94
川端 ⁴⁾	未使用	—	1.4	58.7	5.29
		—	1.2	68.9	5.71
Haldimann ⁵⁾	未使用	—	21.6	68.3	7.2

注： S_{i0} は破壊荷重に関するワイブル尺度パラメータ， m はワイブル形状パラメータであり，板ガラスの残存強度を評価する際に既往の研究で用いられている。

しかし、既存の建物から取り出した窓ガラスは用途や年数が異なり、供用期間の長さが窓ガラスの強度低下に及ぼす影響を定量的に評価することは難しい。そこで本研究では、実変動風荷重装置を用いて任意の風圧をフロート板ガラスに載荷することで、疑似的に経年劣化を生じさせた状態の試験片を作成しリング曲げ試験により残存強度を測定することで、載荷時間や圧力の大きさ違いが強度低下に及ぼす影響を評価し、築年数やガラスの構成に応じたガラスの経年劣化の予測手法を提案することを試みた。

2. 実験方法

2.1 実変動風圧載荷実験

本研究では、Pressure Loading Actuator(以下、PLA)を使用し、ガラスに圧力を載荷する。PLAとは、時々刻々と変動する風圧を再現でき、建物表面に作用する風圧を試験体に載荷することができる装置である(図1左)。PLAはカナダのUniversity of Western Ontario(UWO)で開発され、今回使用したPLAはUWOで開発されたものを参考に東北大学で製作されたものである⁶⁾。

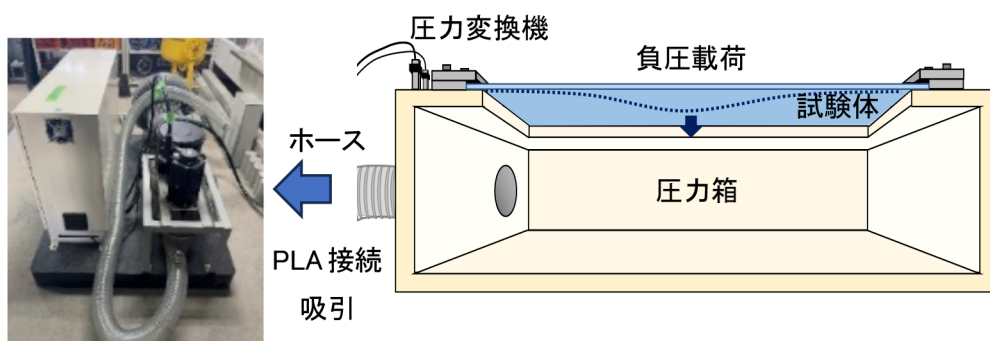


図1 PLA(左)，圧力箱方式による載荷イメージ図(右)

PLA と 1,000mm×1,000mm の新品の板ガラスを設置した圧力箱をホースで接続し、任意の風圧を載荷する(図 1 右)。本報では、1kPa、2kPa の定荷重を載荷した結果について報告する。

2. リング曲げ試験

風圧載荷後の板ガラスの残存強度を求めるため、ISO-1228-5 に規定されているリング曲げ試験を行った。リング曲げ試験を行うために、風圧載荷後の 1,000mm×1,000mm のフロート板ガラスから 240mm×240mm の試験片を作成した。リング曲げ試験は、 $\phi 14$ mm の負荷リングと $\phi 120$ mm の支持リングの間に試験体を設置し、万能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 2)。また、フロート板ガラスは製造の過程で錫面と空気面が生じるが、紫外線ランプにより各面を判別し、今回の試験はすべて錫面が引張側となるように載荷を行った。

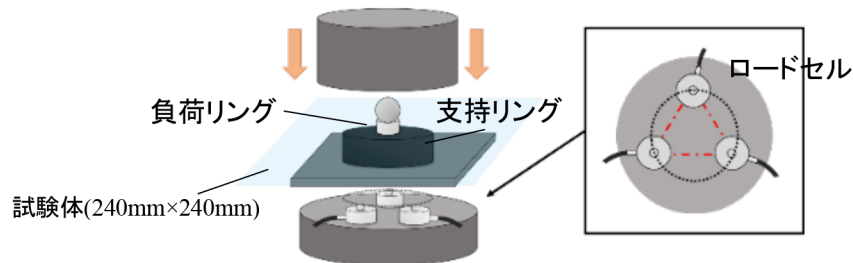


図 2 リング曲げ試験概要図

3. 実験結果

3.1 風圧載荷後の破壊荷重

4段階の載荷時間により各風圧を載荷した板ガラスを試験体とし、リング曲げ試験を行った結果を表 2 に示す。また比較のために別途行った未使用の板ガラスを試験体とした実験の結果も併せて示す。試験結果に用いる値は、破壊起点が負荷リング内、および負荷リング上にある有効試験体のみの結果を採用している。

表 2 の結果より、新品の板ガラスと風圧載荷後の板ガラスの平均破壊荷重にはほとんど差が見られなかった。また、載荷条件ごとに比較した場合、載荷風圧が増加しても平均破壊荷重に大きな差はなく、耐力低下は見られなかった。

表 2 リング曲げ試験結果

試験体			平均破壊荷重 [kN]	変動係数
載荷風圧 [kPa]	載荷時間 [min]	枚数 [枚]		
新品	-	73	1.71	0.23
1	10	23	1.66	0.25
	20	30	1.75	0.21
	30	28	1.80	0.17
	60	12	1.71	0.26
2	10	21	2.04	0.23

3.2 ガラスの蓄積疲労の計算

板ガラスは表面上のクラックが進行し、クラック先端の応力が臨界値に達すると破壊するとされている。その現象は静的疲労という概念により説明され、ガラスに生じている応力から求められる蓄積疲労値を計算する式がBrown⁷⁾により提案されている(式(1))。本研究では今回行った実変動風荷重載荷実験により板ガラスにどれほどの疲労が生じたのか検討を行うため、本式を用いて疲労値を計算した。

$$DA_{crit} = \int_0^{t_f} [p(t)]^s dt \quad (1)$$

ここで、 DA_{crit} は蓄積疲労、 t_f は破壊時刻(載荷時間)、 $p(t)$ は時刻 t における荷重(kPa)、 s は定数($\approx 10 \sim 20$) (今回は17)である。既往研究⁸⁾の試験結果では、板ガラスが破壊するときの DA_{crit} の大きさは、 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{18}$ 程度のオーダーであるとされている。本研究で行った実変動風荷重載荷実験の条件をもとに計算した DA_{crit} を表3に、 DA_{crit} が 1×10^{14} に到達する時間を定荷重ごとに算出した結果を表4に示す。

表3より、本載荷条件では板ガラスの耐力低下にほとんど影響を与えていないと推察された。つまり、板ガラスに1kPa、2kPaを載荷したとき、新品の板ガラスからほとんど劣化が進んでいないと考えられる。これらの結果より、経年劣化による強度低下を生じさせるためには載荷荷重及び載荷時間を増加させる必要がある。表4の結果から、ガラスが破壊に至る 1×10^{14} 程度の蓄積疲労を与えるには、実験室における載荷ということを踏まえ、4kPa程度の載荷を数十分から数時間程度載荷する必要があると考えられる。

表3 載荷時間ごとの蓄積疲労

定荷重 [kPa]	載荷時間 [s]	蓄積疲労 DA_{crit}
1	600	6.0×10^2
	1,200	1.2×10^3
	1,800	1.8×10^3
	3,600	3.6×10^3
2	600	6.0×10^2

表4 DA_{crit} が 1×10^{14} に到達する時間

定荷重 [kPa]	DA_{crit} が 1.0×10^{14} に到達する時間 [s]
1	$1.0 \times 10^{14} \Rightarrow$ 約 300 万年
2	$7.6 \times 10^8 \Rightarrow$ 約 24 年
3	$7.7 \times 10^5 \Rightarrow$ 約 9 日
4	$5.8 \times 10^3 \Rightarrow$ 約 2 時間
5	$1.3 \times 10^2 \Rightarrow$ 約 2 分
6	5.9 $\Rightarrow$ 約 6 秒

4. 結論

本研究においては、建築用フロート板ガラスに対して実変動風荷重載荷装置を用いて風圧を載荷し、人為的に経年劣化させた状態の板ガラス試験体を作成することで、建物が供用期間中に受ける風によって生じる経年劣化が板ガラスの強度低下に及ぼす影響を把握することを試みた。しかしながら、作成された板ガラス試験体をリング曲げ試験により残存強度測定を行った結果、今回行った載荷風圧と載荷時間の範囲では明確な強度低下が見られなかった。疲労の理論式を用いた蓄積疲労値の試算においては、明確な強度低下を生じさせるためには、より大きな載荷風圧(4kPa程度)で、より長い時間(数10分～数時間)載荷を行う必要があることが明らかとなった。

今回の実験では明確なガラスの強度低下は見られなかったが、本実験の結果および疲労値計算の結果と、建物に設置される窓ガラスが供用期間中に受ける風荷重を試算し比較することで、建物の供用期間と窓ガラスの経年劣化の関係を定量的に評価し、より実現象に即した形の窓ガラスの耐風性能評価が可能になると考えられる。

5. 謝辞

本研究は令和4年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) 藤沢采可, 粒来桃子, 今野大輔: 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, 日本建築学会東北支部研究報告集 85号, 103-106, 2022
- 2) 出町謙弥: 経年劣化した窓ガラスの耐風性能評価に関する研究, 八戸工業高等専門学校卒業論文, 2018.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) M.Haldimann: Fractures strength of structural glass elements-analytical and numerical modeling, testing and design, Ph. D. 2006.
- 6) ガヴァンスキ 江梨, 高橋麻衣, 植松康, モリソン・マリー: 実変動風荷重載荷装置の性能評価, 日本建築学会技術報告集第21巻第49号, 2015.
- 7) Brown, W.G.: A practicable formulation for the strength of glass and its special application to large plates., Pub. No. NRC 14372, National Research Council Canada, Ottawa, 1974.
- 8) 今野大輔, 植松康: 窓ガラスの耐風性能に対するガラスの支持条件と形状の影響に関する研究, 日本風工学学会論文集, 42(3), 100-110, 2017.