

# 鋼製骨組に板ガラスが拘束された構造体の 解析手法における形状の一般化と最適化問題への適用 Pattern Generalization and Optimization Problems for Analysis of Glass Panels in a Steel Frame

学籍番号 47-206714

氏名 今井 連 (Imai, Ren)

指導教員 佐藤 淳 准教授

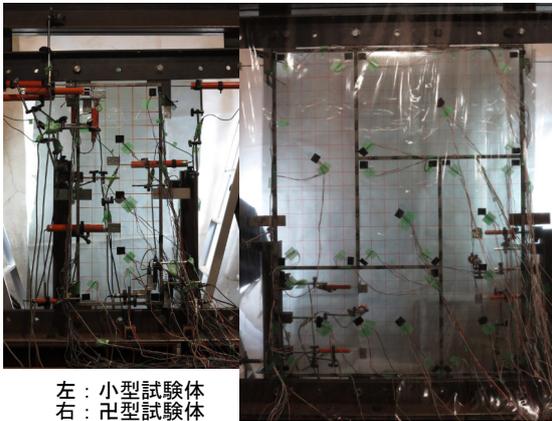
## 1. 序

### 1.1. 研究背景

ガラスは透明材料の中では樹脂系の材料よりも圧縮強度が高く、耐久性に優れているという性質を持つため、構造部材としての利用が期待される。ガラスの構造部材として効かせれば、他の構造部材を細くすることができ、意匠的な軽さを持つ建築やより透明度の高い開放的な建築の設計が可能になる。

### 1.2. ステンドグラス構造

ガラスの構造部材としての利用例に、鋼製骨組に板ガラスが拘束された構造体<sup>[1]-[3]</sup>(以下、ステンドグラス構造)が提案されている(Fig. 1)。ガラスは骨組によって四周を拘束され、その隙間には緩衝材として錫板が挿入される(Fig. 2)。ステンドグラス構造が水平荷重を受けると骨組が先行して変形し、錫板を介してガラスと接触し始めると剛性が発現する(Fig. 3)。剛性が発現すると、ガラスは



左：小型試験体  
右：大型試験体

Fig. 1: ステンドグラス構造

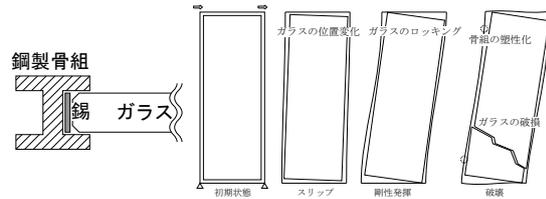


Fig. 2: 断面図

Fig. 3: 変形の概要図

圧縮方向に骨組を拘束し、骨組の塑性化を経て破壊に至る。

### 1.3. 既往研究

既往研究<sup>[1]</sup>では卍型試験体の実験を行い、錫とガラスをブレース材に置換した簡易なモデル(以下、簡易モデル)による解析が提案されている。しかし、解析による初期剛性の再現に課題が残っていた。

既往研究<sup>[2,3]</sup>では小型試験体と卍型試験体の実験が行われ、初期剛性について再現性の高い解析手法(以下、詳細解析)が提案されている。しかし卍型以外の骨組形状については研究が及んでいなかった。

### 1.4. 研究の目的

本研究では、曲線を含めた任意の骨組形状(以下、自由形状)のステンドグラス構造について実験を行い、自由形状に適用可能な初期剛性再現モデルを提案する。さらに、ステンドグラス構造の性能向上を視野に、骨組形状に対して提案したモデル化手法を用いて力学的な最適化問題への適用を目指す。適切なモデル化手法が分かれば、実験によらず骨組形状を最適化できるようになると期待される。

## 2. 試験体形状の決定と実験の詳細

### 2.1. 試験体の設計

モデル化の妥当性を実験的に検証するために、2種類の自由形状の骨組を設計する。骨組形状は複数の候補の中から、3章で述べる詳細解析の結果をもとに決定した。候補となる形状には初期剛性が高いと推測される形状や不規則な曲線を含んだ形状を挙げた。その中で特に初期剛性が高いと判断された形状についてさらに派生形となる複数の形状を候補にし、詳細解析を行った(Fig. 4)。解析結果と形状を考慮して、一体目の試験体は形状120(以下、うろこ型)、二体目の試験体は形状135(以下、曲線型)に決定した(Fig. 5)。

断面がH-15x12x4.5x3の骨組部材と公称厚さ $t=8.0$  mmのガラスの間に緩衝材として厚

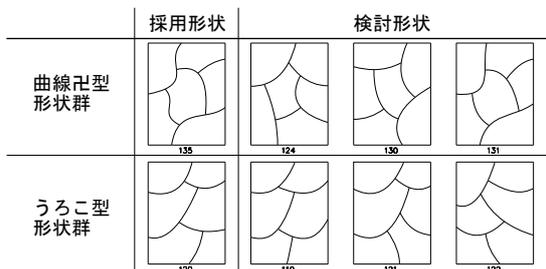


Fig. 4: 検討した骨組形状(抜粋)

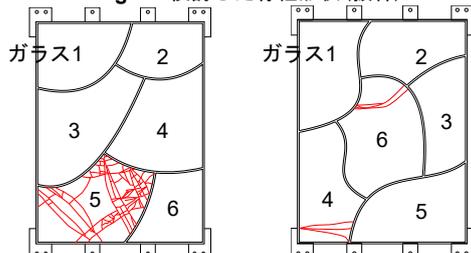


Fig. 5: 試験体形状(左: うろこ型, 右: 曲線型)

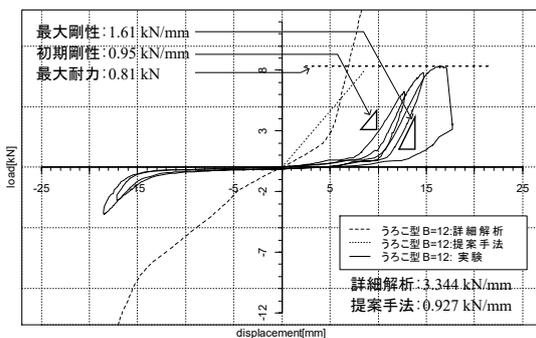


Fig. 7: 実験結果と解析結果(左: うろこ型, 右: 曲線型)

さ $t=1$  mmの錫板を挿入する。試験体をセットアップし、正方向、負方向にそれぞれ繰り返し水平載荷を行った(Fig. 6)。

### 2.2. 実験結果

実験結果をグラフに示す(Fig. 7)。うろこ型では、ガラス5が加力中に突如破壊して脱落した。最大荷重は8.1 kN(正方向)であった。曲線型では、ガラス6にまず亀裂が生じ、その後ガラス4にも亀裂が生じたのちガラス6が破壊して脱落した。最大荷重は11.5 kN(負方向)であった。初期剛性([kN/mm])はうろこ型で0.95、曲線型が1.00であった。また、剛性の最大値は、うろこ型で1.61、曲線型で2.43であった。いずれも型型の既往実験値1.29に比べて剛性が高い。また、座屈荷重が高いことも分かっている。

### 3. 詳細解析

本章では詳細解析<sup>[2,3]</sup>を自由形状に適用し、骨組形状が初期剛性に与える効果を分析した。その結果、形状によって圧縮される錫板の範囲が変化し、初期剛性に大きな影響を与える可能性が示された(Fig. 8)。

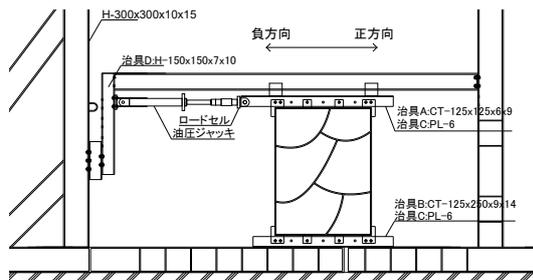
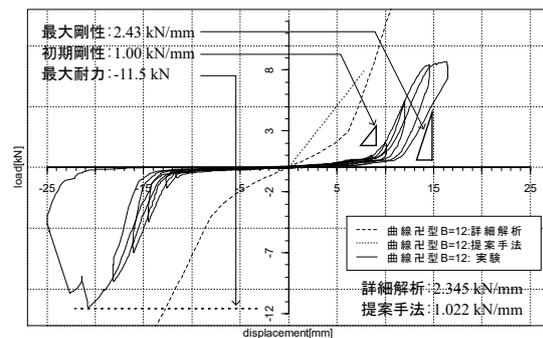


Fig. 6: 試験体と試験機



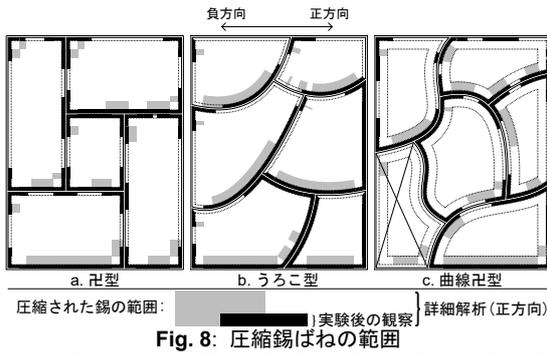


Fig. 8: 圧縮錫ばねの範囲

実験後の観察は試験体を分解して目視で行った。正方向と負方向の圧縮範囲であることに留意する。詳細解析は圧縮錫ばねの箇所から範囲を求めた。図は比較のために模式的に表現している。

解析結果を実験結果と比較したところ、初期剛性は高めに評価される結果となったが、卍型よりも初期剛性が高いことを示している点や、実験で確認された圧縮錫の範囲と特徴が類似していることから、一定の再現性は備えていると分析された (Fig. 7, Fig. 8)。

#### 4. 自由形状に適用可能な再現モデルの提案

本章では、既往研究<sup>[1]</sup>で提案されたガラスと錫をブレース置換する簡易モデルを改善するモデル化手法を提案し、自由形状でも初期剛性が再現できることを示す。

##### 4.1. モデル化と解析手法

###### 4.1.1. ガラスのモデル化

ガラスは応力が伝達される有効範囲を菱形とする (Fig. 9-a)。有効範囲をブレースの軸方向に積分して (Fig. 9-b)、剛性の等価な等断面材に置換する (Fig. 9-c)。

###### 4.1.2. 錫板のモデル化

錫板は既往研究<sup>[4]</sup>で提案されたばねモデルに置換する (Fig. 10-a)。ただし、提案モデルでは錫ばねがガラスの角部に位置する場合に剛性値を変位が等価になるように置換式を改めた (Fig. 10-b)。

###### 4.1.3. 骨組と取付プレートのモデル化

骨組はH型断面、取付プレートは長方形断面を持つ線材モデル置換した (Fig. 11)。支持条件・荷重条件は取付プレートの寸法に基づき決定した (Fig. 11-b, Fig. 12)。

## 4.2. 解析と結果分析

線形弾性解析を行い、水平変位から初期剛性を算出した。解析諸元は表のとおりである (Table 1)。小型・卍型で初期剛性に実験結果と良い一致が見られた (Table 2)。うろこ型・曲線卍型では圧縮ブレースの配置を探索する手法を経て、初期剛性に実験結果とよい一致が見られた (Fig. 13)。

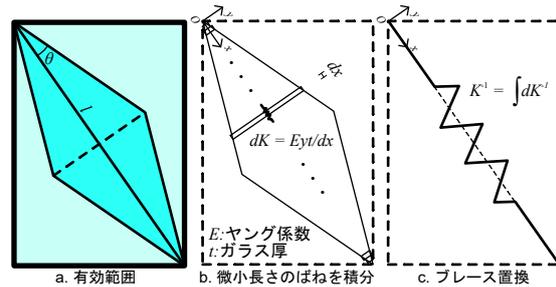


Fig. 9: ガラスのブレース置換

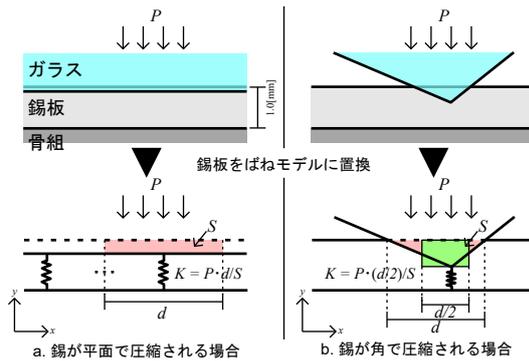


Fig. 10: 錫ばねモデルの概要

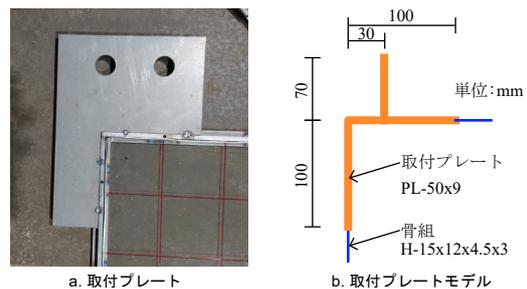


Fig. 11: 取付プレートモデル

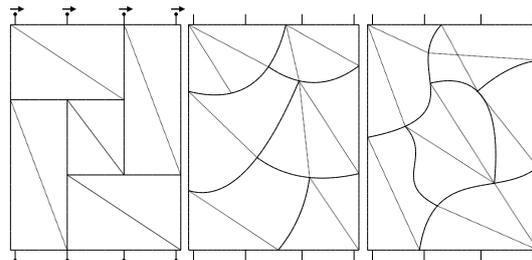


Fig. 12: 荷重・支持条件

Fig. 13: 再現モデル

**Table 1: 解析諸元**

| モデル部材 | ヤング率<br>[kN/mm] | 断面積<br>[mm] | $I_{xx}$<br>[cm] | $I_{yy}$<br>[cm] | $J_{zz}$<br>[cm] |
|-------|-----------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| 骨組    | 205.8           | 100.5       | 0.1047           | 0.3017           | 0.0349           |
| プレート  | 205.8           | 450.0       | 9.1375           | 0.3038           | 0.0759           |
| 錫ばね   | 49.0            | 23.792      | 0.0001           | 1.0000           | 1.0000           |
| 角錫ばね  | 49.0            | 0.6642      | 0.0001           | 1.0000           | 1.0000           |

**Table 2: 初期剛性の比較([kN/mm])**

| 形状   | 簡易モデル <sup>[1]</sup> | 提案モデル | 実験                  |
|------|----------------------|-------|---------------------|
| 小型   | 1.424                | 0.783 | 0.71 <sup>[3]</sup> |
| 卍型   | -                    | 0.846 | 0.80 <sup>[2]</sup> |
| うろこ型 | -                    | 0.927 | 0.95                |
| 曲線卍型 | -                    | 1.022 | 1.00                |

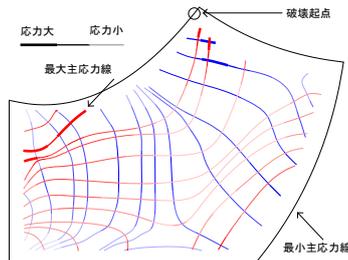


Fig. 14: うろこ型ガラス5の主応力線図と破壊起点

## 5. ガラスの応力再現モデルの提案

実験で骨組の座屈変形がガラスの亀裂を誘発すると観察されたため、座屈解析に基づく初期不整を与えたモデルで自由形状のガラスに伝達される応力を算定した。うろこ型のガラス5で応力状態を分析すると、実験での破壊起点付近で応力が集中している様子が再現された (Fig. 14)。

## 6. 形状操作による力学的最適化

本章では、4章で提案した初期剛性再現モデルを用い、骨組形状を操作する変数を設定して力学的な最適化問題を解いた。

### 6.1. 最適化問題の設定

骨組形状は曲線卍型、変数は骨組形状を決定する5つの節点の変位ベクトルとした (Fig. 15)。目的関数は初期剛性の最大化とする。解析計算は静的線形弾性解析、最適化は遺伝的アルゴリズム (以下、GA法) 及びHill Climbing法 (以下、HC法) の2種類で行った。

### 6.2. 最適化の結果

最適化計算を行った結果、GA法とHC法で類似の結果を得た (Fig. 15)。初期剛性[kN/

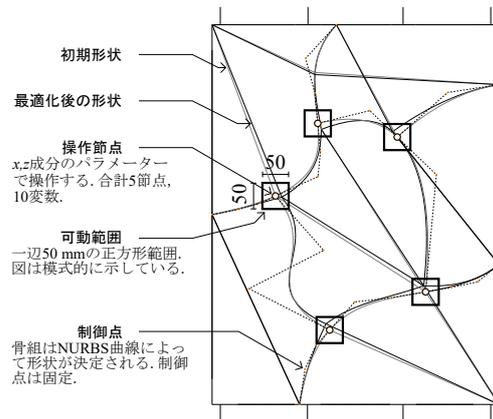


Fig. 15: 最適化形状と最適化パラメータ

GA法は、初期遺伝子数100、交配遺伝子数50とし、75世代交配を行った。HC法は、最大ステップ幅0.1、正規分布の乱数による近傍探索を行った。試行回数は1000。両手法でほぼ解が一致したため、図にはGA法による解のみを示す。

mm)は初期解1.10からGA法で1.34、HC法で1.36に向上できた。

## 7. まとめ

本研究の成果として、自由形状のステンドグラス構造の初期剛性とガラスの応力について、次の手法を適用したモデル化により解析と実験を整合させられたことが挙げられる。・ガラスの微小ばねの積分によるブレース置換、・角部の錫ばねの剛性低減効果を踏まえたばねモデル、・取付プレートによる荷重・支持条件の適正化、・座屈解析に基づく初期不整の付与。さらに、骨組形状に対して初期剛性再現モデルを用いて最適化を行い、性能の向上可能性を示した。

今後の課題として、次が挙げられる。・初期剛性再現モデルにおける、錫ばねの有効範囲とガラスブレースの配置の決定手順の簡便化、・ステンドグラス構造の終局及び履歴の再現モデルの確立、・試験体実験による骨組形状最適化の実証。

### <主な参考文献>

- [1]本田幾久世 他, "ガラス板が拘束された骨組の設計におけるモデル化の提案", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012
- [2]大霜潤也, "鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体における初期剛性を再現するモデル化", 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, 2019
- [3]今井連, "鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体におけるガラスの位置変化と解析手法", 東京大学工学部建築学科卒業論文, 2019
- [4]大霜潤也 他, "鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体における錫緩衝材としての錫の挙動の分析", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2018