

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
社会文化環境学専攻

2016 年度  
修 士 論 文

鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体における  
初期剛性及び座屈荷重の評価法

Evaluation Method for Initial Stiffness and Buckling Load  
In the Glass Panels Stiffened By Steel Frame

2017 年 1 月 23 日提出  
指導教員 佐藤 淳 准教授

瀧本 信幸  
Takimoto, Nobuyuki

# 目次

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 1 章 序論                           | 3   |
| 1.1 研究の背景                          | 3   |
| 1.2 既往の研究                          | 6   |
| 1.3 研究の目的と方法                       | 9   |
| 1.4 論文の構成                          | 11  |
| 第 2 章 モデル化の理論                      | 12  |
| 2.1 概説                             | 12  |
| 2.2 モデル化の理論                        | 13  |
| 2.2.1 鋼製骨組によるガラス板の座屈拘束機構のモデル化      | 13  |
| 2.2.2 錫の材料非線形性のモデル化                | 19  |
| 2.3 結語                             | 20  |
| 第 3 章 要素試験体の実験と解析                  | 21  |
| 3.1 概説                             | 21  |
| 3.2 要素試験体実験                        | 22  |
| 3.2.1 実験概要                         | 22  |
| 3.2.2 実験結果                         | 24  |
| 3.3 要素試験体モデルの線形座屈解析                | 30  |
| 3.3.1 解析概要                         | 30  |
| 3.3.2 解析結果                         | 34  |
| 3.4 実験結果と解析結果の分析と考察                | 64  |
| 3.4.1 フランジ幅 $B$ と座屈荷重 $P_{cr}$ の関係 | 65  |
| 3.4.2 フランジ幅 $B$ と初期剛性 $K$ の関係      | 66  |
| 3.5 補足的に検討した事項について                 | 67  |
| 3.6 結語                             | 68  |
| 第 4 章 円型試験体の実験と解析                  | 69  |
| 4.1 概説                             | 69  |
| 4.2 円型試験体実験                        | 70  |
| 4.2.1 実験概要                         | 70  |
| 4.2.2 実験結果                         | 74  |
| 4.3 円型試験体モデルの静的解析                  | 77  |
| 4.3.1 解析概要                         | 77  |
| 4.3.2 解析結果                         | 84  |
| 4.4 実験結果と解析結果の分析と考察                | 109 |
| 4.4.1 フランジ幅 $B$ と初期剛性 $K$ の関係      | 110 |
| 4.5 結語                             | 116 |
| 第 5 章 結論                           | 117 |

|             |     |
|-------------|-----|
| 第 6 章 今後の課題 | 118 |
| 参考文献        | 119 |
| 謝辞          | 121 |

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

紀元前 4000 年以上昔にガラスは発見製造されてから、現代においては日常生活に不可欠であり、芸術の分野においても、人の心を魅了してやまない材料である。またガラスは可視光線のほぼ全域を透過し、この透光性はほかのいかなる材料と比べても本質的である。

建築においては、中世 1220 年に初期ゴシック様式の大聖堂としてシャルトル大聖堂が建設され、フライングバットレスで支えられ高く採られた窓にはステンドグラスがはめ込まれた。(図 1) また産業革命がおこると第一回ロンドン万国博覧会 (1851 年) の会場として鉄骨とガラスによる建築クリスタルパレス (ジョセフ・パクション設計) が建設され、建築世界の近代化を拓いた。(図 2)



図 1: シャルトル大聖堂のステンドグラス<sup>1)</sup>



図 2: クリスタルパレス<sup>2)</sup>

20 世紀半ばにはにガラスの製造法として革命的ともいえるフロート法が発明されるなど、平滑で透視性を備えた板ガラスの大量供給が可能になり、近代には、ミース・ファン・デル・ローエによってファンズワース邸 (1950 年)(図 3) が設計され、建設されるなど近代建築の名作と呼ばれるような建築がうみだされてきた。



図 3: ファンズワース邸<sup>3)</sup>

芸術の分野においても、マルセル・デュシャン (Marcel Duchamp、1887年7月28日-1968年10月2日) の通称「大ガラス」と呼ばれる作品『彼女の独身者によって裸にされた花嫁、さえも』(The Bride Stripped Bare by Her Bachelors, Even)(1923年)(図4) や、フランシス・ピカビア (Francis-Marie Martinez Picabia、1879年1月22日-1953年11月30日) の透明の時代 (1927-1932年) と呼ばれる時代に制作された作品群 (図5) などが現れ、透明な素材による試行は新しい視覚経験をもたらしてきたといえよう。<sup>6)</sup>

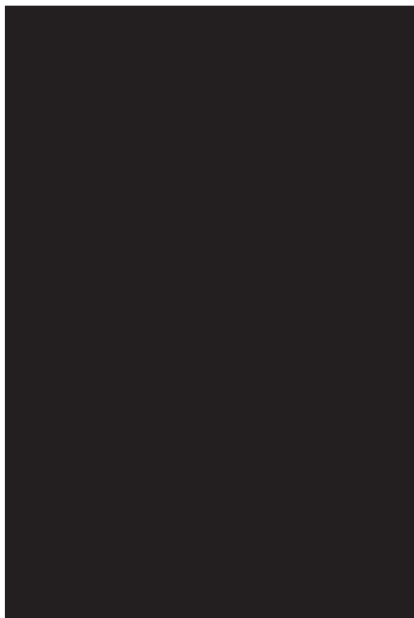


図4: デュシャン『大ガラス』<sup>4)</sup>



図5: ピカビア『Hera』<sup>5)</sup>

さて、確かに透光性、透視性、また反射性を備えたガラスが発明され、近代現代建築において多く用いられるようになり新たな視覚経験は発見されたが、ガラスが用いられるのは主に外装材やカーテンウォール、開口部あるいは間仕切り壁としてであった。カーテンウォールとして用いられ風荷重に抵抗し破損しないよう耐風設計が為されているなど二次部材として構造的安全性を評価し用いられる例はあるが、ガラスを耐力壁として用いるなどの建築物の主たる構造材料に用いられる例は数少ない。

ところでガラスの材料特性を表すヤング係数や圧縮強度、引張強度、曲げ強度の値をいくつかの建築材料と比較してみると、ガラスのヤング係数は  $71,000\text{N/mm}^2$  とアルミニウム合金とほぼ同程度であり、一般的に使われる普通コンクリートのヤング係数  $20,500\text{N/mm}^2$  の約3倍程度である。また圧縮強度は鋼鉄 (SS400) の約2倍程度であるが、引張強度はアルミニウム合金 (5254-O) の約1/4倍程度である。<sup>8)</sup>(表1中の単位はすべて  $\text{N/mm}^2$ )

表1: 様々な材料のヤング係数と強度

| 材質                | ヤング係数   | 圧縮強度 | 引張強度 | 曲げ強度 |
|-------------------|---------|------|------|------|
| 鋼鉄 (SS400)        | 205,000 | 400  | 400  | 400  |
| アルミニウム合金 (5254-O) | 70,000  | -    | 240  | -    |
| 普通板ガラス            | 71,000  | 900  | 56   | 60   |
| 強化ガラス             | 71,000  | -    | -    | 360  |
| 普通コンクリート (fc24)   | 20,500  | 40   | 3    | -    |

---

以上より、ガラスはアルミニウム合金とほぼ同程度のヤング係数もち(アルミニウム合金ほど加工しやすく軽いわけではないが)、鋼鉄(SS400)のおよそ倍程度の圧縮強度をもつため、ガラス部材に入る応力および変形を設計によりコントロールすれば、主構造体として建築に活用することは十分に可能である。

これまで不透明であった耐力壁やブレースなどの主要な構造体に、文字通り透明なガラスが用いられることが可能になれば建築の表現の幅は大きく広がるであろう。

本研究では鋼製骨組によってガラス板が拘束された構造体(以後『ステンドグラス状耐力壁』と呼ぶ。)を研究対象とし、その力学的な性能について研究を行う。後に詳述するが、この構造体は小径のH型鋼のフランジ溝に錫を緩衝材として挿入しガラス板をはめ込んだ構造体であり、ガラスとH型鋼が相互に座屈を補剛しあうものとなっている。本研究では、佐藤らによって行われている研究<sup>23)</sup>で提案されているような構造体とその解析モデルに対し、ステンドグラス状耐力壁のより詳細な構造的評価のために詳細なモデル化および解析を行い、実験との対応について分析する。

## 1.2 既往の研究

先に述べたように、ガラスの材料特性としては構造材料として十分に使えるオーダーのものである。ガラスを構造材料として用いることを試みる研究のひとつに、山中昌之、田中眞夫、和久井智、和田章らによる透明制振壁に関して一連の研究が挙げられる。山中らによる研究ではガラスは隅部が固定される形での面内载荷であり、ガラスそのものの挙動は測定できるものの、座屈の補剛はされていない点で本研究とは少々趣旨が異なる。

ほかにも、久田隆司らによってガラス板柱の座屈に関する研究などが行われており、支持部材で挟まれたガラス柱について、一方を固定支持、もう一方をピン支持とし座屈試験と座屈解析が行われている。ここでは支持枠の呑み込み深さ  $l$  とガラス板厚  $t$  を変数として座屈長さ係数  $\alpha$  の関係について興味深い結果が示されており、 $l/t$  が増大すれば  $\alpha$  は急速に 0.5 に近づくという結果が報告されている。<sup>13)14)15)</sup> ただし、久田らによって研究されているガラスの支持枠形状は佐藤らの提案する構造体の枠材に比して、少々複雑でありサイズが大きいため大きいスパンを仕切るような耐力壁とする際には支持枠が空間の透明性の獲得に悪影響を及ぼす可能性がある。また、佐藤らによって提案されている構造体のように、ガラスを小径の H 型鋼製骨組に落とし込むという構法 (cf. 『弱い技術』<sup>25)</sup>) に関する研究報告はない。

佐藤らによって研究が行われてきたステンドグラス状耐力壁 (図 6) の解析モデルは、設計に用いることを目標として簡易化されており、金箱らによる薄鋼板を耐力壁として用いる構造についての研究<sup>26)27)</sup> を元にガラスはブレース化されている。(図 7, 10) また実験から、ガラスを升目状に配置するより卍型に配置したほうが、ガラスが鋼製骨組の座屈を拘束し最大耐力が大きくなることが判明して以後、ステンドグラス状耐力壁は卍型配置の試験体 (以後『卍型試験体』と呼ぶ。) について実験が重ねられている。<sup>18)</sup>

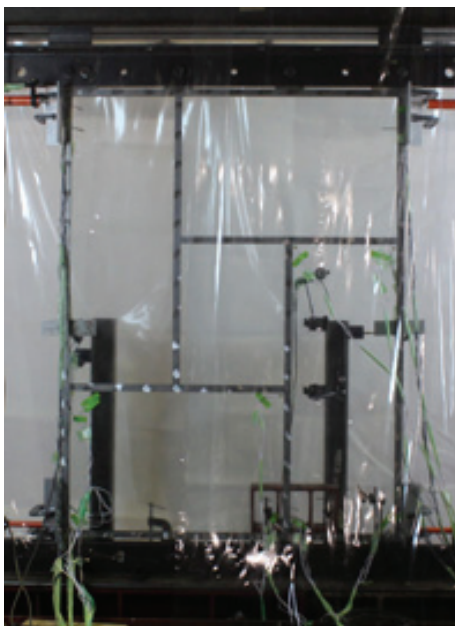


図 6: 既往研究における試験体形状

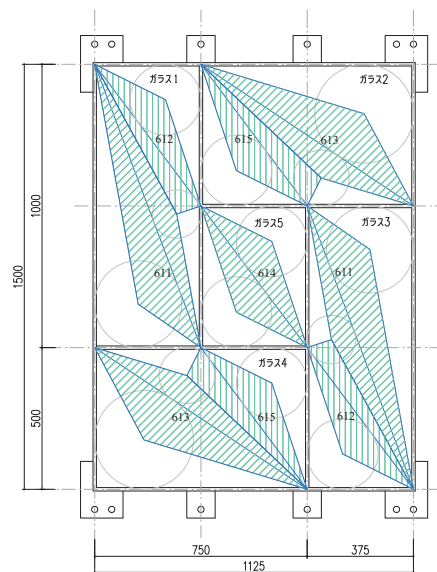


図 7: ブレースの負担面積

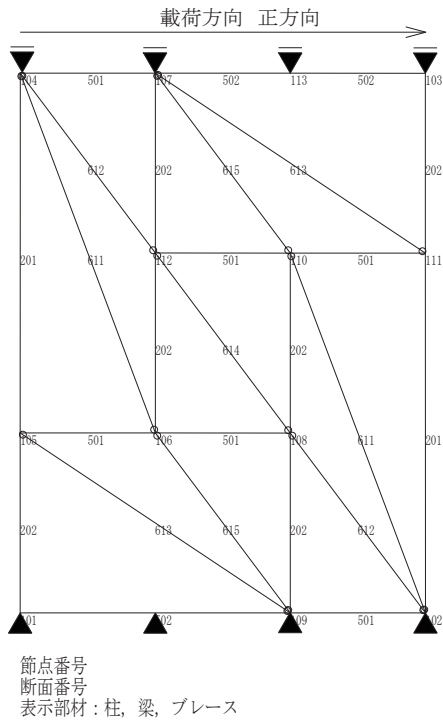


図 8: 簡易解析モデル正方向

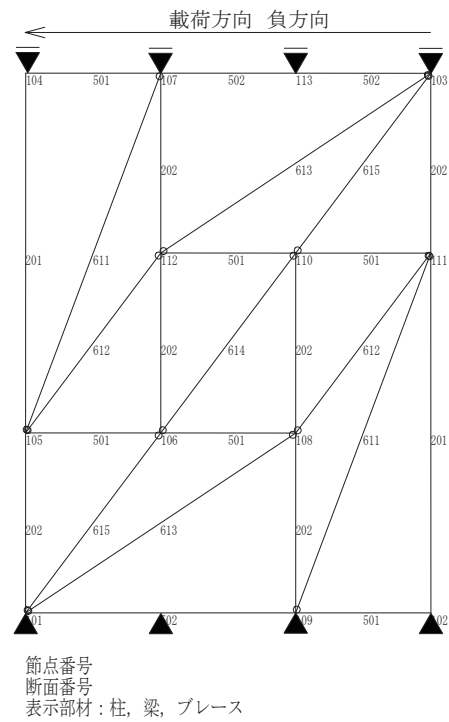


図 9: 簡易解析モデル負方向

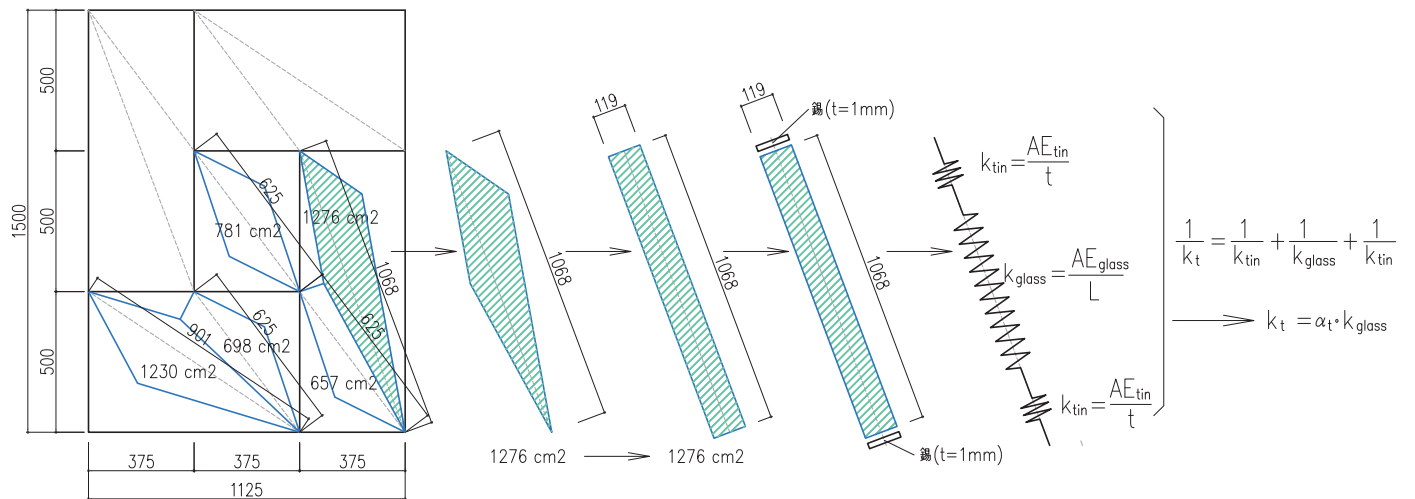


図 10: 既往研究<sup>23)</sup>で行われているブレース化の手順



また簡易化のためガラスをブレースとしてモデル化する形で提案されている解析モデル(図8,9)(以後『簡易解析モデル』と呼ぶ。)に基づきモデルを作成し解析した結果、H型試験体における解析モデルのガラスブレース部材の座屈長さ係数 $\kappa_g$ と鋼材の断面二次モーメント $I_y$ は次の式1.2.1のような設定すれば、実験と解析における骨格曲線は良好な対応をとることが報告されている。

$$\kappa_g = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2.18 \cdot I_y + 0.70}} & B \leq 20 \text{ mm} \\ 0.76 & B > 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (1.2.1)$$

$\kappa_g$  : ガラスブレースの座屈長さ係数

$I_y$  : 鋼製骨組断面二次モーメント ( $\text{mm}^4$ )

$B$  : 鋼製骨組フランジ幅 (mm)

また剛性低減係数 $\alpha_t$ は $\alpha_t=1/20$ とすれば実験値と解析値が良い対応をとること(これは錫のヤング係数 $E_{tin}$ を $9.8\text{N/mm}^2$ としたものに相当する。)、さらに吸収エネルギーと塑性率を実験値から算出し、設計時には塑性率を2.0、Ds値を0.25と設定すれば安全側で評価できることなどがわかっている。しかしながら、錫の挙動と剛性低減係数の関係性の定量的な解明や、ガラスの形状と座屈長さ係数の関係、またのフランジ幅と座屈長さ係数の関係解明、すなわち座屈拘束の機構の解明が課題として挙げられている。

### 1.3 研究の目的と方法

これまでの佐藤らにより研究されている構造体について、ガラスの座屈は鋼製骨組のフランジにより拘束されているため、フランジ幅が大きくなるにつれてガラスの座屈長さが短くなることは感覚的には理解できる。しかしながら解析モデルに入力するガラスプレースの座屈長さ係数  $\kappa_g$  は実験値に合わせる形で定められており、演繹的に記述されていない。また簡易解析モデルにおいて、錫はガラスとの直列バネとして考えられてはいるものの、錫のヤング係数  $E_{tin}$  は実験値に合わせる形で採用されてきたため、その錫の挙動と剛性低減係数の関係の解明が今後の課題として挙げられている。

以上のことから、その座屈補剛の機構を詳細にモデル化し解析することで、鋼材とガラスの相互座屈拘束機構や錫の挙動について理論的解析的に記述可能なものとし、実験結果と比較することで本研究で提案する理論の適用範囲も明らかになると考えられる。そのため鋼製骨組とガラスの拘束機構をその原理から考察、把握し、新たに詳細な解析モデル(以後、『詳細解析モデル』と呼ぶ。)を作成する。作成した詳細解析モデルに対して、静的解析および線形座屈解析を行い、その結果を分析することで座屈拘束機構を解明すること目的とする。

本研究ではこれまで佐藤らによって研究されてきたステンドグラス状耐力壁を対象とする。アスペクト比の異なる3種のガラス(375x1000, 750x500, 375x500)が組み合わさったH型試験体(図11)、またH型試験体の一部分を取り出した要素試験体(375x1000)(図12)について行われた実験に対して、新たに詳細な解析モデルを提案し静的解析および線形座屈解析を行い結果について分析を行う。

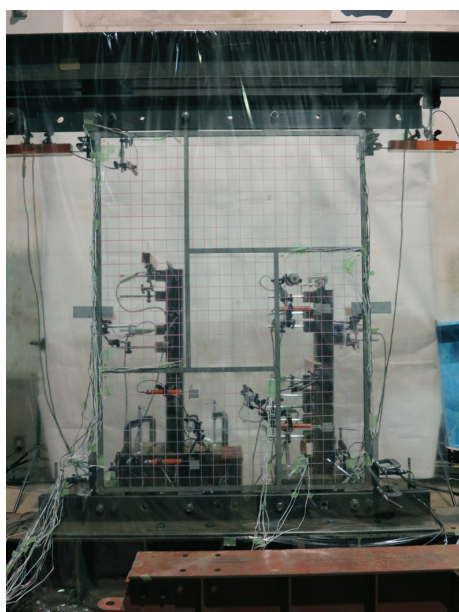


図 11: H型試験体



図 12: 要素試験体

要素試験体およびH型試験体についての実験のパラメータはガラスを拘束するH型鋼のフランジ幅  $B$  とする。なお載荷方法については試験体 301,302 のみ一定振幅とし、残りすべての試験体は変形角漸増とする。(表2) 本研究のために新たに行った実験は。試験体 202,203,206 である。

なお詳細解析モデルではフランジによる拘束および錫を部材としてモデル化し、静的解析および線形座屈解析を行う。静的解析の結果把握できる変形量と応力状態から主に錫の挙動および初期剛性について分析し、線形座屈解析の結果からは、鋼材とガラスの相互座屈拘束効果について分析する。

要素試験体の詳細解析モデルでは静的解析および、線形座屈解析を行う。静的応力解析の結果把握できる応

表 2: 試験体諸元

| 試験体形状<br>寸法 (幅 x 高さ)(mm) | 試験体名                   | フランジ幅 B(mm)<br>(H-15xBx4.5x3) |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 要素試験体<br>(375x1000)      | 試験体 101 <sup>22)</sup> | 14                            |
|                          | 試験体 102 <sup>22)</sup> | 20                            |
|                          | 試験体 103 <sup>22)</sup> | 24                            |
| H型試験体<br>(1125x1500)     | 試験体 201 <sup>20)</sup> | 12                            |
|                          | ○ 試験体 202              | 12                            |
|                          | ○ 試験体 203              | 12                            |
|                          | 試験体 204 <sup>22)</sup> | 16                            |
|                          | 試験体 205 <sup>20)</sup> | 20                            |
|                          | ○ 試験体 206              | 20                            |
|                          | 試験体 207 <sup>23)</sup> | 24                            |
|                          | 試験体 301 <sup>23)</sup> | 12                            |
|                          | 試験体 302 <sup>23)</sup> | 12                            |

力状態と変形量から、錫のヤング係数設定の妥当性を確認し、構造体全体の初期剛性について実験結果と解析結果を比較し分析する。またH型試験体の詳細解析モデルについては静的解析を行い、実験結果と解析結果の初期剛性について比較し分析する。

後に詳述するが、さしあたり以下の表 3 に行われた実験と解析それぞれの試験体と解析モデルの対応関係を示す。

表 3: 試験体と解析モデルの対応関係

| 試験体形状 | フランジ幅 B(mm) | 試験体名                   | 解析モデル名   |
|-------|-------------|------------------------|----------|
| 要素試験体 | 12          | -                      | Unit101  |
|       | 14          | 試験体 101 <sup>22)</sup> | Unit102  |
|       | 20          | 試験体 102 <sup>22)</sup> | Unit103  |
|       | 24          | 試験体 103 <sup>22)</sup> | Unit104  |
|       | 30          | -                      | Unit105  |
| H型試験体 | 12          | 試験体 201 <sup>20)</sup> | Multi101 |
|       |             | ○ 試験体 202              |          |
|       |             | ○ 試験体 203              |          |
|       |             | 試験体 301 <sup>23)</sup> |          |
|       |             | 試験体 302 <sup>23)</sup> |          |
|       | 16          | 試験体 204 <sup>22)</sup> | Multi102 |
|       | 20          | 試験体 205 <sup>20)</sup> | Multi103 |
|       |             | ○ 試験体 206              |          |
|       | 24          | 試験体 207 <sup>23)</sup> | Multi104 |
| 30    | -           | Multi105               |          |

## 1.4 論文の構成

まず第 1 章では序章として、本研究の背景、既往の研究について、また研究の目的と方法について述べた。

第 2 章では、モデル化の理論として、主に、第 3,4 章で扱う解析モデルのモデル化について、すなわち鋼製骨組によるガラスの拘束機構のモデル化と、錫の材料非線形性のモデルへの反映法について述べる。

第 3 章では本研究で対象とするステンドグラス状耐力壁構造の要素試験体について行った実験と解析、また解析結果の分析について述べる。

第 4 章では凹型試験体について行った実験と解析、また解析結果の分析について述べる。

第 5 章で、以上第 3,4 章で得られた結果の分析を結論としてまとめ、第 6 章で本論文では行き届かなかった点など今後の課題について述べる。

## 第2章 モデル化の理論

### 2.1 概説

本章では、本研究におけるモデル化の理論について述べる。まず、本研究で対象とする「鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体」の形状や寸法などディテールについて述べる。また変形時の諸部材の接触関係について幾何学的に把握し、接触関係を反映した諸部材のモデル化の方法について詳しく述べる。

## 2.2 モデル化の理論

### 2.2.1 鋼製骨組によるガラス板の座屈拘束機構のモデル化

まず本研究で対象とする構造体 (H型試験体、要素試験体) の概形を図 13、14 に示す。

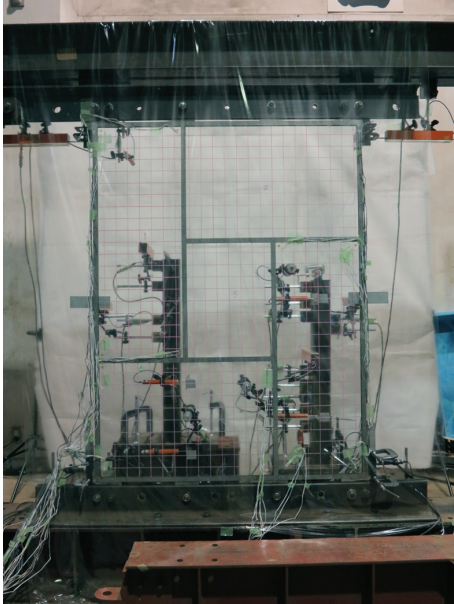


図 13: H型試験体

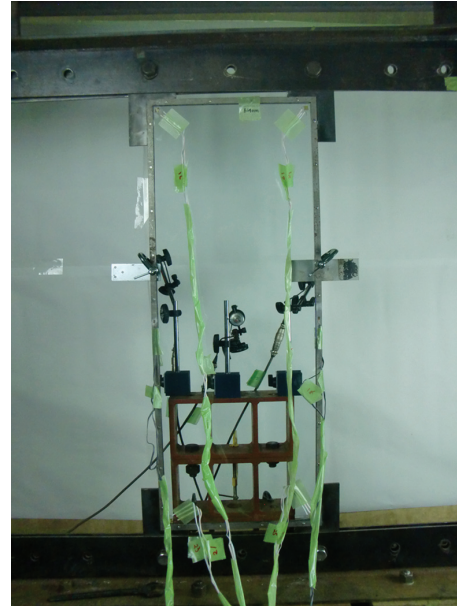


図 14: 要素試験体

詳細の写真と図を以下図 15、16 に示す。図 16 に示すように、本構造の特徴は錫板 (1mm) を緩衝材とし、厚さ 7.9mm のガラスを小径の H 型鋼のフランジ間にただ嵌め込んでいる点にある。片側のフランジはビス止めする仕様となっており、M3 の皿ビスで幅 4.5mm ウェブに固定されている。

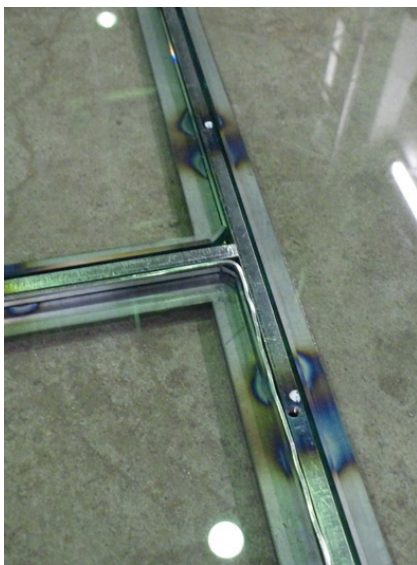


図 15: 詳細写真

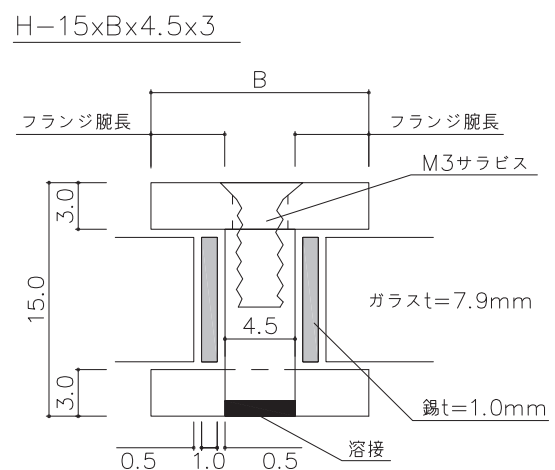


図 16: 詳細図

本構造に水平荷重を面に載荷した際には、模式図 17,18 に示すような挙動がみられる。

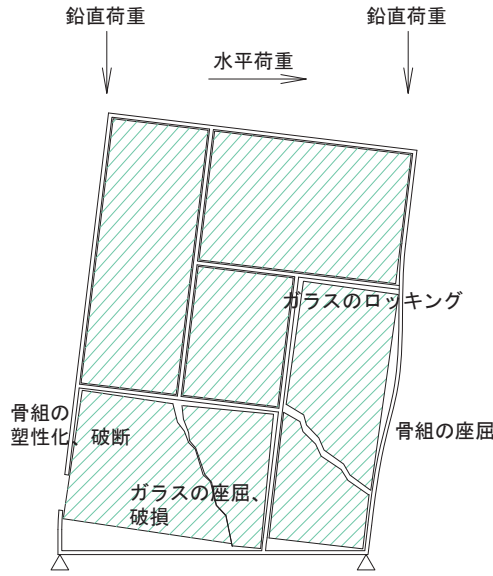


図 17: U型試験体加力時模式図<sup>21)</sup>

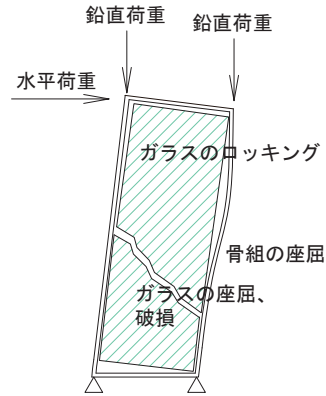


図 18: 要素試験体加力時模式図

そのため、解析モデルの作成に先立ち、次の2点を再現するモデル化が求められる。

まず1点目は、ガラスと錫の接触について、2点目は、ガラスとH型鋼の接触についてである。ガラスと錫は接着されていないため、水平載荷時にはガラスの一部は錫にめり込み、一部は錫から浮き上がる。すなわち錫は圧縮にのみ抵抗し、引張力は負担しないため、圧縮専用要素として扱う。(図 19)

またガラスと鋼材についても同様に、ガラスはH型鋼のフランジ間にただ置かれているだけであり、接着剤やボルトなどで固定されていない。そのため、載荷した際にガラスの面外変形はまずH型鋼のフランジに接触する形で拘束され、フランジに伝わった力はH型鋼に伝達され、H型鋼の断面二次モーメント(強軸)で座屈を拘束する。(図 20)



図 19: 錫圧縮状況 (フランジ幅 14mm)

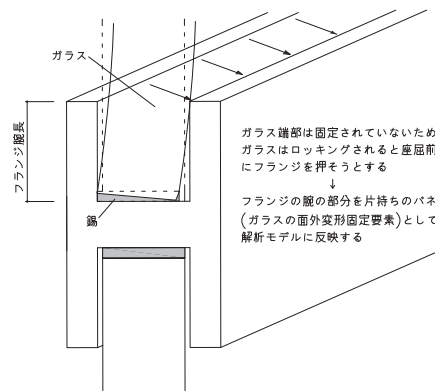


図 20: ガラスとフランジの接触の模式図

また、この試験体面内に水平荷重が载荷されると、スリップ終了時には図 21 のように変形するものと考えられる。すなわち、鋼製骨組は平行四辺形型にせん断変形し、一方ガラスはフレーム内で回転し、平行四辺形の短対角線長さとガラスの対角線長さが等しくなったときにロッキングすると考えられる。図 21 中の斜線部は H 型鋼製フレームのフランジの拘束内にあるガラス部分を示す。ロッキング時に H 型鋼のフランジからガラスが浮き上がり、ガラスの一部はフランジの面外拘束から外れる状態が発生する。したがってフランジから外れる部分のガラスはフランジの拘束を除去するものとしている。(図 24)

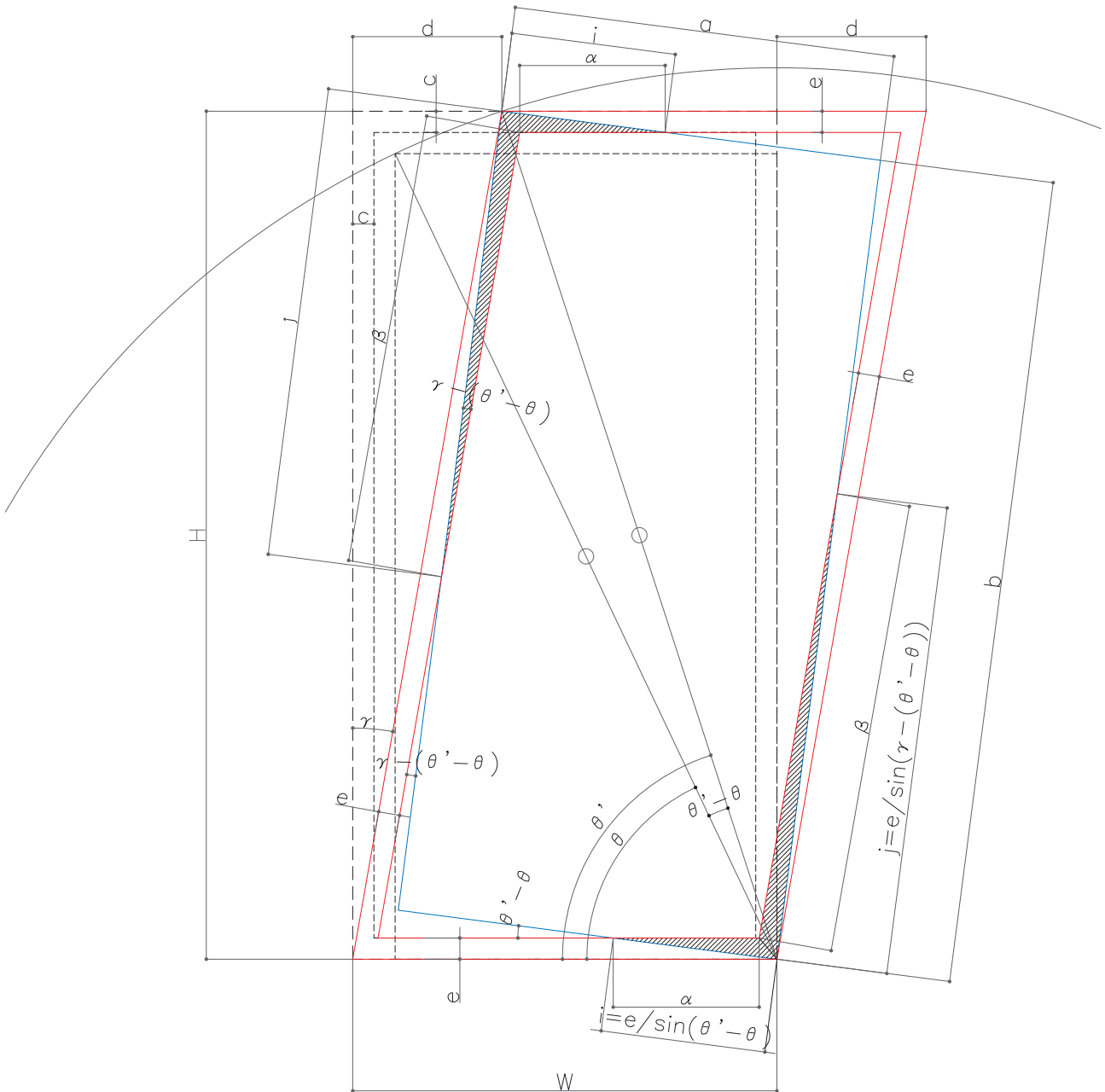


図 21: 変形時の諸部材の接触関係



図 21 における  $\alpha$  と  $\beta$  が鋼製フレーム側のガラス拘束長を示す。  
 なお  $\alpha$  と  $\beta$  は幾何学的に以下の式で与えられる。

$$\begin{cases} \alpha = i \cos(\theta' - \theta) - e + \sin \gamma \\ \beta = j \frac{1}{\cos(\gamma - (\theta' - \theta))} - e \frac{1}{\cos \gamma} + e \tan(\theta' - \theta) \end{cases} \quad (2.2.1)$$

$W$  : 鋼製鋼製フレーム内法幅 (mm)

$H$  : 鋼製フレーム内法高さ (mm)

$a$  : ガラス幅 (mm)(=  $W - 2c$ )

$b$  : ガラス高さ (mm)(=  $H - 2c$ )

$c$  : 鋼製フレームとガラスのクリアランス (2mm)

$d$  : 鋼製フレームのロッキング時の水平変位 (mm)(=  $W - \sqrt{a^2 + b^2 - H^2}$ )

$e$  : フランジ腕長 (mm)

$\alpha$  : H 方向の鋼製フレーム側のガラス拘束長 (mm)

$\beta$  : W 方向の鋼製フレーム側のガラス拘束長 (mm)

$\gamma$  : 鋼製フレームの変形角 (rad)( $\tan \gamma = \frac{d}{H}$ )

$i$  : W 方向のガラス側の鋼製フレームに拘束される部分の長さ (mm)(=  $\frac{e}{\sin(\theta' - \theta)}$ )

$j$  : H 方向のガラス側の鋼製フレームに拘束される部分の長さ (mm)(=  $\frac{e}{\sin(\gamma - (\theta' - \theta))}$ )

$\theta' - \theta$  : ガラスの回転角 (rad)

$\theta$  :  $\sin \theta = \frac{H}{\sqrt{a^2 + b^2}}$

$\theta'$  :  $\sin \theta' = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$

式 (2.2.1) よりフランジ幅  $e$  と鋼製フレーム側のガラス拘束長  $\alpha, \beta$  の関係が次図 22,23 のように描ける。

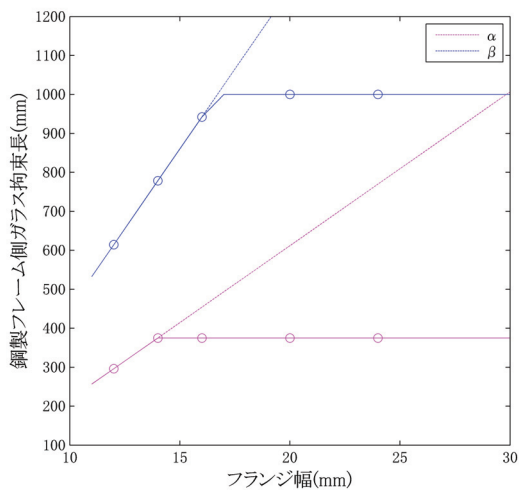


図 22:  $e-\alpha, \beta$  の関係 (375mmx1000mm)

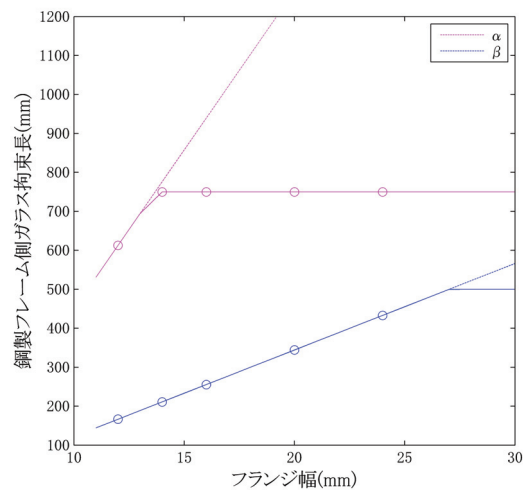


図 23:  $e-\alpha, \beta$  の関係 (750mmx500mm)

すなわち、図 22 より 375x1000 の試験体ではフランジ幅が 12mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (296.1mm, 624.5mm)、フランジ幅が 16mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (375mm(全長), 942.2mm)、フランジ幅が 24mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (375mm(全長), 1000mm(全長)) となることを意味する。

同様に、図 23 より 750x500 の試験体ではフランジ幅が 12mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (612.5mm, 166.5mm)、フランジ幅が 16mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (750mm(全長), 255.4mm)、フランジ幅が 24mm であれば拘束長 ( $\alpha, \beta$ ) は (750mm(全長), 433.0mm) となることを意味する。

以上のことから解析モデル図 24 に示すように、解析モデルの H 型鋼とガラスの間には、軸方向圧縮には緩衝材として働く錫を入力し、面外曲げに対してはガラスを拘束するフランジの腕を剛体 (曲げ剛性は無限大) として入力している。またガラスとフランジのすべりに対する復元力に相当するものはないと考え、面内方向の曲げ剛性は見込まず 0 としている。それぞれの解析モデルの断面諸元については後の章で詳述する。

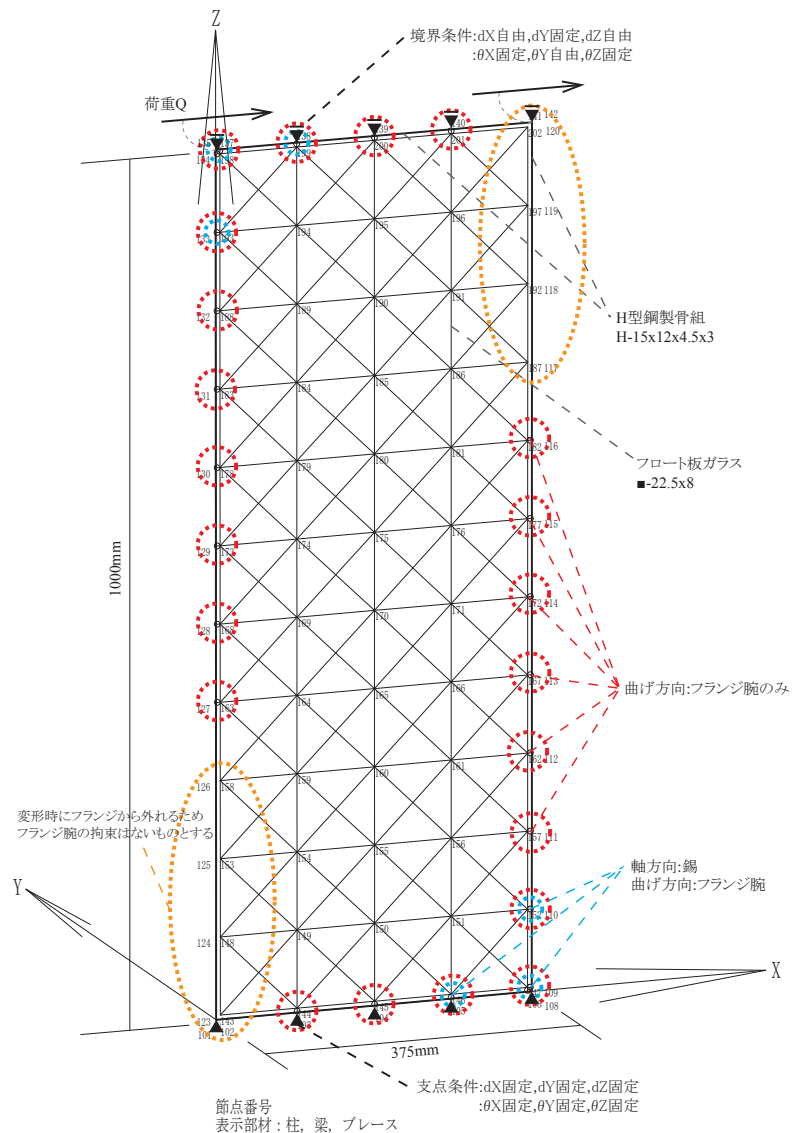


図 24: 解析モデル Unit101(要素型フランジ幅 12mm の場合のモデル)

また鋼材と錫とガラスの境界条件など詳細を以下の図 25 に示す。

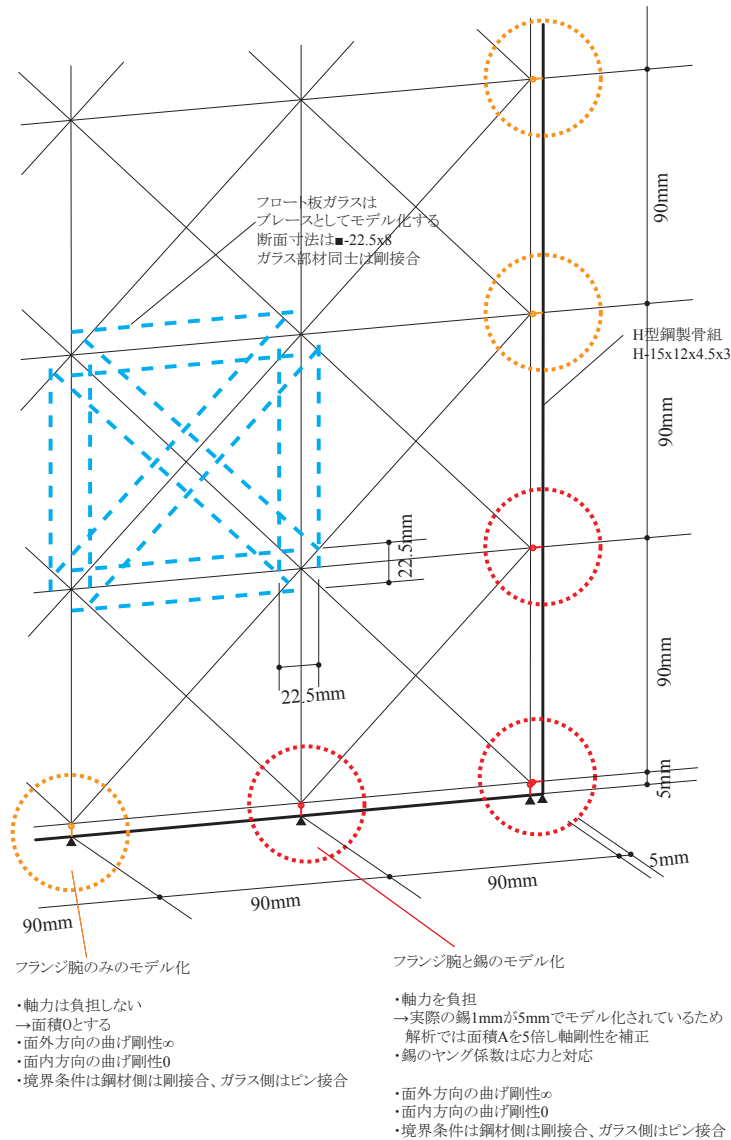


図 25: 解析モデルの詳細

上の図 25 のように、ガラスは 90mm のグリッドに X 型にブレースを配置し、ブレース一本は幅 22.5mm 厚さ 8mm の断面とする。またガラスと鋼製骨組の間の部材は、鋼製骨組のフランジ腕による拘束と緩衝材としての錫を 1 部材でモデル化している。実際には、フランジ腕によるガラスの拘束、すなわち面外方向曲げに対する剛性はフランジ幅が大きくなるにつれて大きくなるものと推測できるが、ここでは無限大としてモデル化している (サンブナの捻り剛性も無限大)。また緩衝材としての錫板の軸力負担面積  $A_{tin}$  はグリッドの 1 スパン分にあわせ  $A_{tin}=90 \times 8(\text{mm}^2)$  とし、端部の錫の負担面積はグリッドの半スパン分とし  $A_{tin}/2$  としている。さらに、実際の錫板の厚みは 1mm であるが、解析モデル上ではガラスと鋼製骨組のクリアランスを含め長さ 5mm で入力しているため、面積を 5 倍し軸剛性を補正している。

境界条件については、ガラス-ガラス間は剛接合、鋼材-鋼材間も剛接合とし、鋼材-錫間は剛接合、錫-ガラス間は x,y 方向回転自由のピン接合としている。

2.2.2 錫の材料非線形性のモデル化

錫のヤング係数は公称値  $50\text{GPa}(50,000\text{N/mm}^2)$  であるが<sup>10)</sup>、本研究では公称値ではなく既往の錫の圧縮試験に基づく値を用いるものとする。

錫は非常にやわらかい金属であり、また錫板厚は  $1\text{mm}$  であるため、ガラスから圧縮力を受けると錫の剛性は次第に上昇する非線形な挙動を示す。アントニラによって行われたフランジにはめ込まれた錫を押しつぶす圧縮試験によれば、荷重変形曲線と応力歪み関係を表す曲線は図 26,27 のように非線形となる。

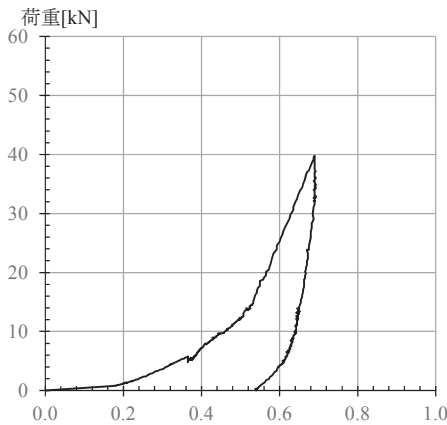


図 26: 錫圧縮試験の荷重変形曲線

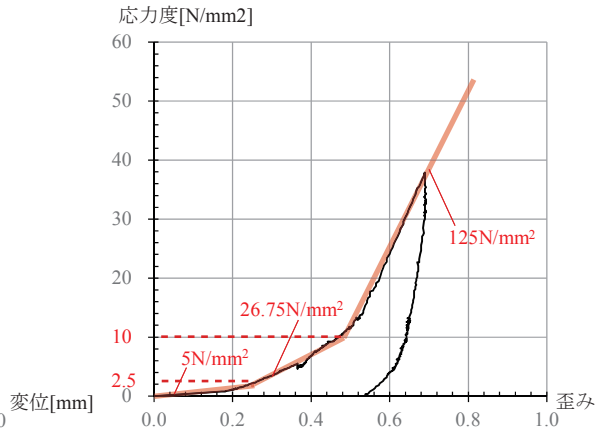


図 27: 錫圧縮試験の応力歪み曲線

そこで、錫のヤング係数を一律に公称値を用いることは実現象とかけはなれるため、錫部材のヤング係数  $E_{tin}$  は図 27 の赤線のようにトリリニアなものとし、1つの解析モデル内で錫のヤング係数  $E_{tin}$  は錫に入力される圧縮応力に応じて部材毎に変えるものとする。(表 4)

既往の論文<sup>22)</sup>では、応力値が  $3.30\text{N/mm}^2$  のときのヤング係数  $26.74\text{N/mm}^2$  を用いることが提案されており、本論文では応力度が  $2.5\text{N/mm}^2 < \sigma_{tin} \leq 10.0\text{N/mm}^2$  の範囲にこれを用いるものとする。

つまり、解析は以下のように行う。まず錫のヤング係数はすべて  $5\text{N/mm}^2$  とした仮解析モデルを作成し、上部 2 節点に  $Q=$  計  $0.3\text{tf}$  荷重する静的解析をおこなう。(静的解析において上部に荷重する荷重を  $0.3\text{tf}$  としたのは、要素試験体の実験において  $Q=0.4\sim 0.5\text{tf}$  程度で構造体は座屈しているため、弾性域である  $0.3\text{tf}$  荷重時の様子から錫の挙動を考えるためである。)

静的解析の結果、 $Q=0.3\text{tf}$  荷重時の錫の圧縮応力が錫の圧縮応力  $\sigma_{tin}$  が  $2.5\text{N/mm}^2$  を超える部材は、錫のヤング係数を  $26.74\text{N/mm}^2$  とし、錫の圧縮応力  $\sigma_{tin}$  が  $2.5\text{N/mm}^2$  以下の部材は、錫のヤング係数を  $5.0\text{N/mm}^2$  のままとし、本解析モデルとする。

表 4: 応力に応じて用いる錫のヤング係数

| 応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )   | $\sigma_{tin} \leq 2.5$ | $2.5 < \sigma_{tin} \leq 10.0$ | $10.0 < \sigma_{tin}$ |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ ) | $5 (=E_{tin1})$         | $26.74 (=E_{tin2})$            | $125.0 (=E_{tin3})$   |

### 2.3 結語

第2章では、ステンドグラス状耐力壁構造の初期剛性および座屈補剛の機構を詳細に把握するため、緩衝材である錫部材のヤング係数  $E_{tin}$  およびガラスの面外変形を拘束するフランジ部材のモデル化の方法を示し、詳細解析モデルを作成した。

ただし、ガラスの面外変形を拘束するフランジ部材のモデル化については、ガラスとフランジが接触し、H型鋼強軸周りの断面二次モーメントでガラスの変形が拘束される機構がモデル化されており、既往研究<sup>14)</sup>でなされているような枠材による母材の呑み込み深さによる端部の固定度の変化、すなわちフランジによるガラスの呑み込み深さによりガラスの変形を拘束する機構はモデル化されていない。

この機構についてのモデル化については今後の課題である。

次章以降ではこの詳細解析モデルを用いて、第3章では要素試験体について、第4章ではH型試験体について解析し、それぞれ実験結果と解析結果を比較する。

## 第 3 章 要素試験体の実験と解析

### 3.1 概説

本章では要素試験体についての実験と解析について述べる。まず要素試験体実験の詳細、つまり試験体の形状、寸法、および計測器の設置位置、載荷方法について示し、実験結果として、面外方向、面内方向の荷重変形曲線および損傷状況を示す。また第 2 章で述べた理論に基づいて要素試験体をモデル化し静的解析および線形座屈解析を行う。解析結果として得られた変位量から初期剛性を算出し、座屈固有値から座屈荷重を算出する。

### 3.2 要素試験体実験

#### 3.2.1 実験概要

要素実験は H 型鋼製骨組のフランジ幅  $B$  をパラメータとし  $B=14\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、 $24\text{mm}$  の 3 種類の要素試験体 (図 28) について、面内水平载荷試験 (繰り返し载荷試験) が行われた。<sup>22)</sup> なお载荷方法は漸増とし、ガラスが破損し耐力がなくなるとみなしたところで载荷終了としている。

表 5 に示すように、試験体の寸法は芯寸法で [幅  $\times$  高さ] が  $[375\text{mm} \times 1000\text{mm}]$ 、ガラスは厚さ  $t=7.9\text{mm}$  のフロート板ガラスを用い、ガラスと H 型鋼製骨組の間には厚さ  $t=1\text{mm}$  の錫板を挿入している。

測定器設置位置、試験機へのセットアップの様子を図 29、32 に示す。なお面内方向の水平変位は試験体頂部に取り付けた変位計 1,2 の平均と、脚部に設置した変位計 3,4 の平均の差から算出し、また面外方向の変位は試験体の左右端の鋼材に設置した変位計 5,7 の値をそれぞれ鋼材の面外変位、ガラスの部に設置した変位計 6 の値をガラスの面外変位として用いるものとした。



図 28: 要素試験体

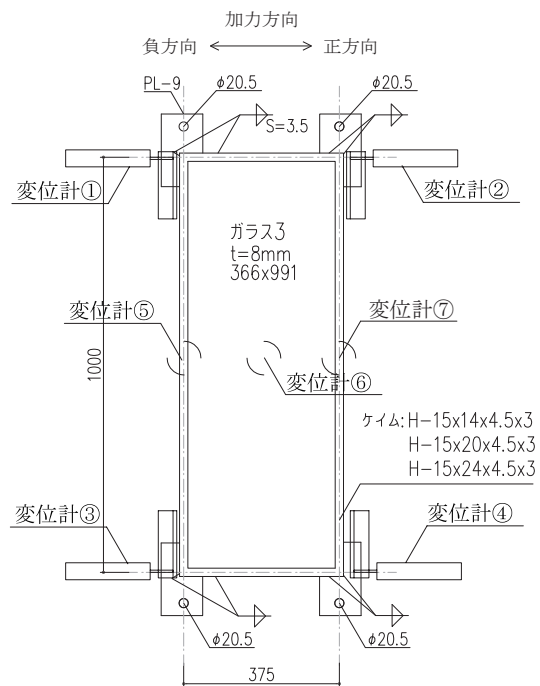


図 29: 試験体形状、変位計位置

実験結果として、初期剛性は得られた荷重変形曲線においてスリップ終了後の弾性域であると考えられる  $3\text{kN}$  時の接線剛性から読み取っている。また座屈荷重については、次のように読み取っている。試験体 (圧縮側鋼材) の面外方向の変位は、载荷初期からある一定の勾配で大きくなるが、ある荷重点を境に勾配が小さくなり、荷重の増分に対する変形の増分が大きくなる。その点を座屈した点 (座屈荷重) とみなす。本実験の場合、1 サイクル目はガタなどにより荷重変形曲線が安定しないため、2 サイクル目以降の安定したサイクルからこの座屈荷重を読み取った。

座屈荷重点の読み取りについて、試験体 101 を例に説明する。まず試験体 101 の実験で得られる面外荷重変形曲線は図 30 のようであり、面外荷重変形曲線 (正方向載荷時の圧縮側鋼材) の 3 サイクル目は、図 31 の赤線に示すものである。載荷初期から、圧縮側鋼材の面外変形は黒破線のように、荷重の増加に対してある一定の勾配で増加するが、4kN 付近から黒破線はずれ、荷重の増加に対して変形の増加が大きくなるため、4kN で座屈したとみなしている。

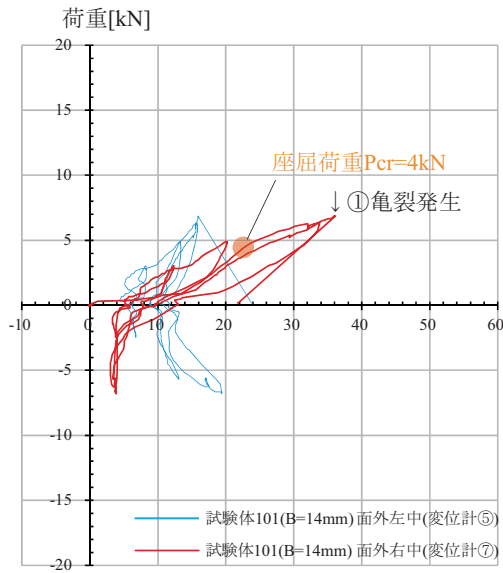


図 30: 面外荷重変形曲線 (鋼材)

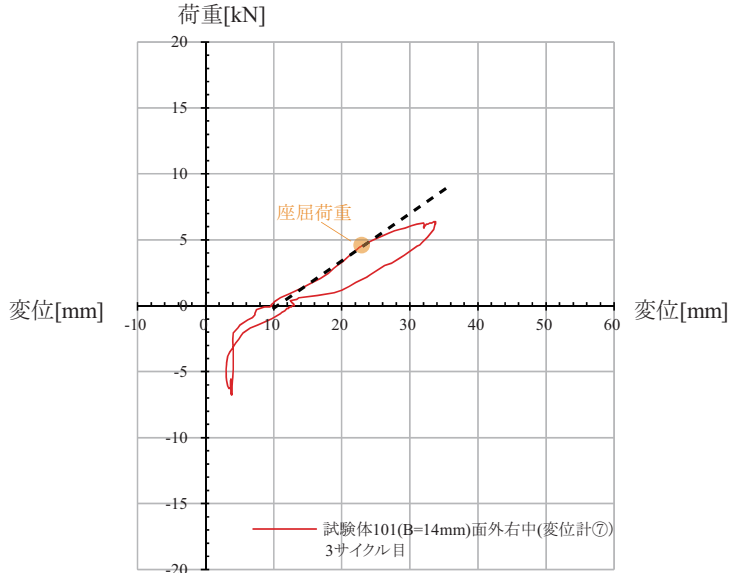


図 31: 面外荷重変形曲線 (3 サイクル目)

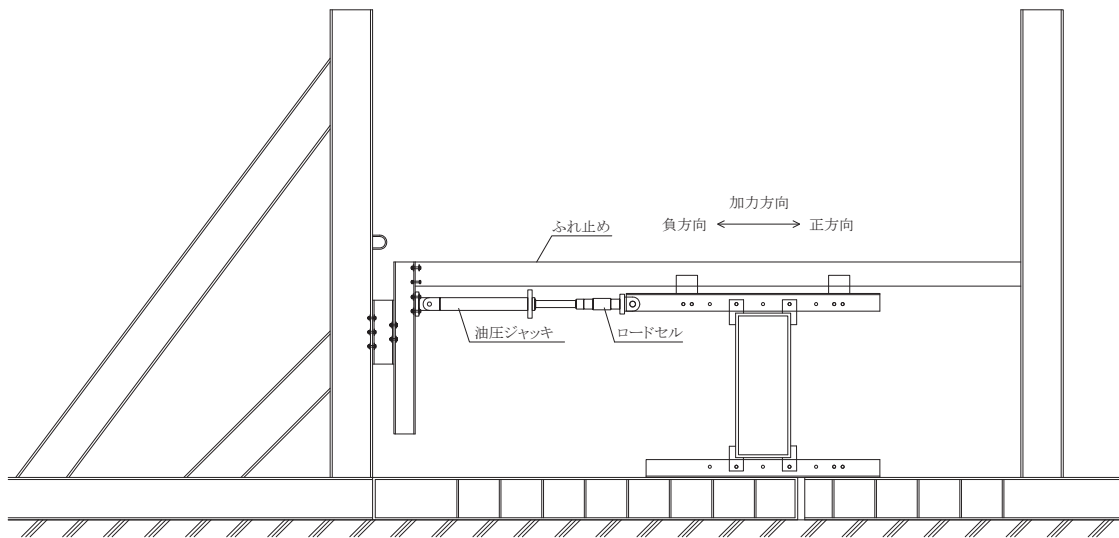


図 32: 要素試験体試験機セットアップ図

表 5: 要素試験体諸元

| 試験体名                   | H 型鋼製骨組断面     | ガラス板厚 (mm) | 錫板厚 (mm) |
|------------------------|---------------|------------|----------|
| 試験体 101 <sup>22)</sup> | H-15x14x4.5x3 | 8          | 1        |
| 試験体 102 <sup>22)</sup> | H-15x20x4.5x3 | 8          | 1        |
| 試験体 103 <sup>22)</sup> | H-15x24x4.5x3 | 8          | 1        |



### 3.2.2 実験結果

得られた実験結果を以下に示す。なお以下に示す荷重変形曲線は縦軸を図 32 におけるロードセルが測定した値、すなわち試験体上部に入力される荷重 (kN) としている。

#### ■ 試験体 101(B=14mm) の実験結果

試験体 101 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 35 から、15mm 程度スリップし、初期剛性は概ね 0.40kN/mm 程度で荷重は上昇し、4 サイクル目正方向荷重時に変形がスリップを含め 40mm、最大耐力 7kN 付近に達したところで図 33,34 に示すように、ガラスが破損していることがわかる。

次に、面外の荷重変形曲線の図 36,37 から、圧縮側の鋼材 (変位計 7 設置側) は荷重開始から面外にはらみだすが、荷重が 4kN 付近を境に荷重変形曲線の勾配が小さくなることから 4kN 付近で座屈、同様にガラスについても 4kN 付近で座屈しているとみなすことができる。



図 33: 試験体 101(B14) 損傷写真

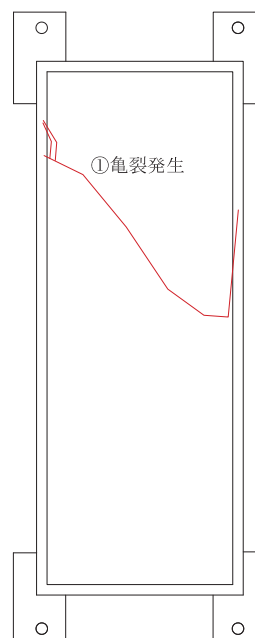


図 34: 試験体 101 損傷状況

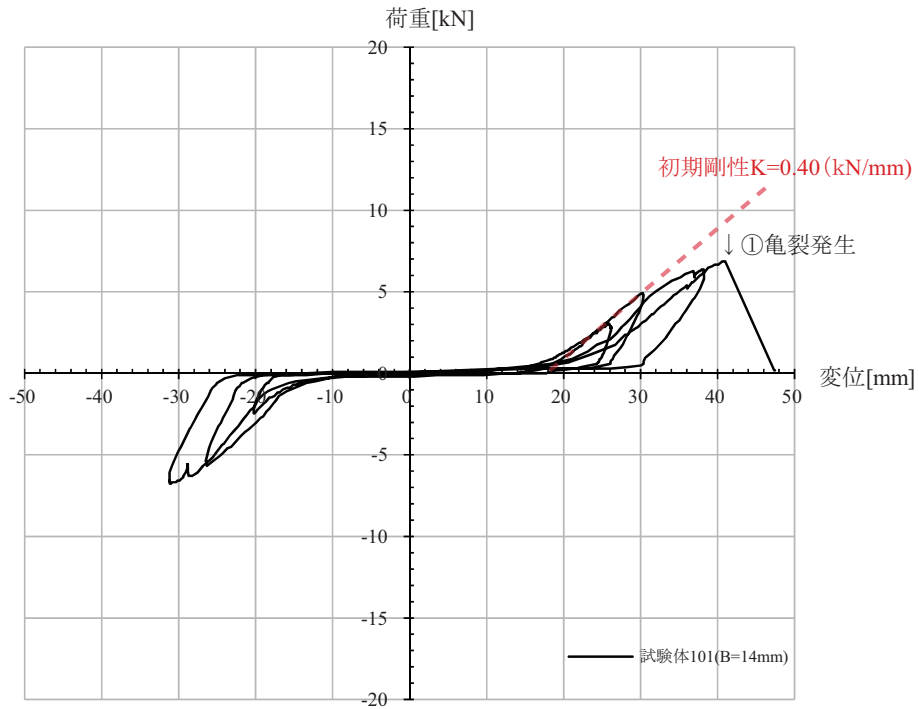


図 35: 面内荷重変形曲線

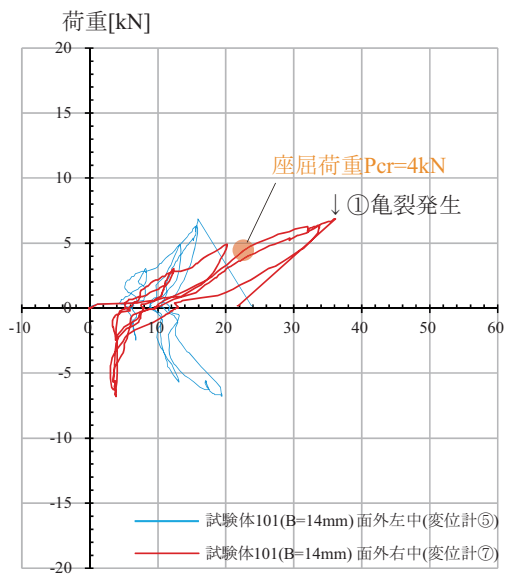


図 36: 面外荷重変形曲線 (鋼材)

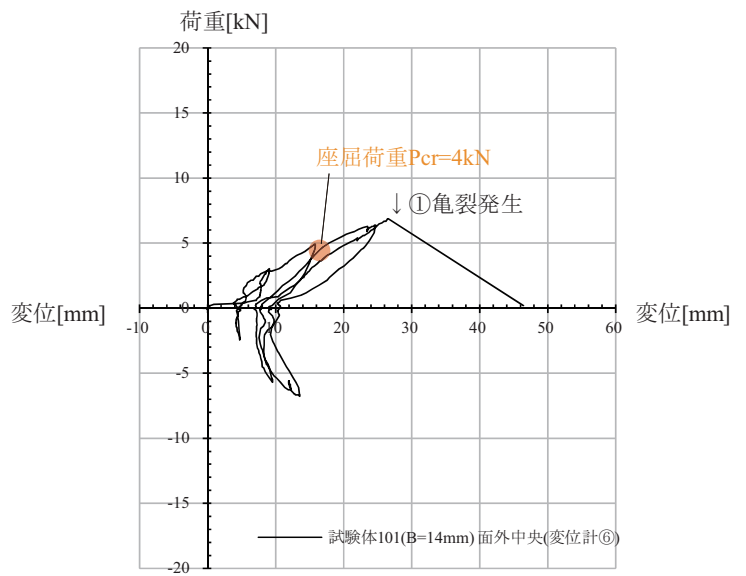


図 37: 面外荷重変形曲線 (ガラス)

■ 試験体 102(B=20mm) の実験結果

試験体 102 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 40 から、試験体 101 と同様に、15mm 程度スリップし、初期剛性は試験体 101 より少々大きくなり、概ね 0.51kN/mm 程度で荷重は上昇し、4 サイクル目正方向載荷時に変形がスリップを含め 34mm、最大耐力 9kN 付近に達したところで図 38,39 に示すように、ガラスが破損していることがわかる。

次に、面外の荷重変形曲線の図 41,42 から、圧縮側の鋼材 (変位計 7 設置側) は載荷開始から面外にはらみだすことがわかる。試験体 102 の面外の荷重変形曲線の結果は少々読み取りづらいが、荷重が 4kN 付近を境に荷重変形曲線の勾配が小さくなることから 4kN 付近で座屈、同様にガラスについても 4kN 付近で座屈しているとみなすこととする。



図 38: 試験体 102(B20) 損傷写真

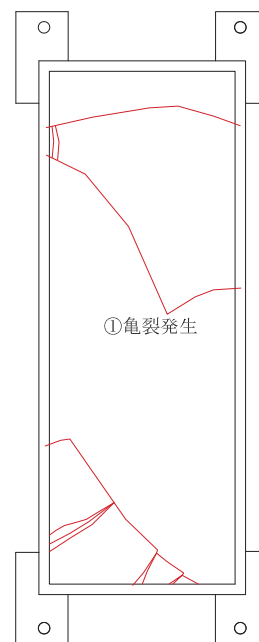


図 39: 試験体 102 損傷状況

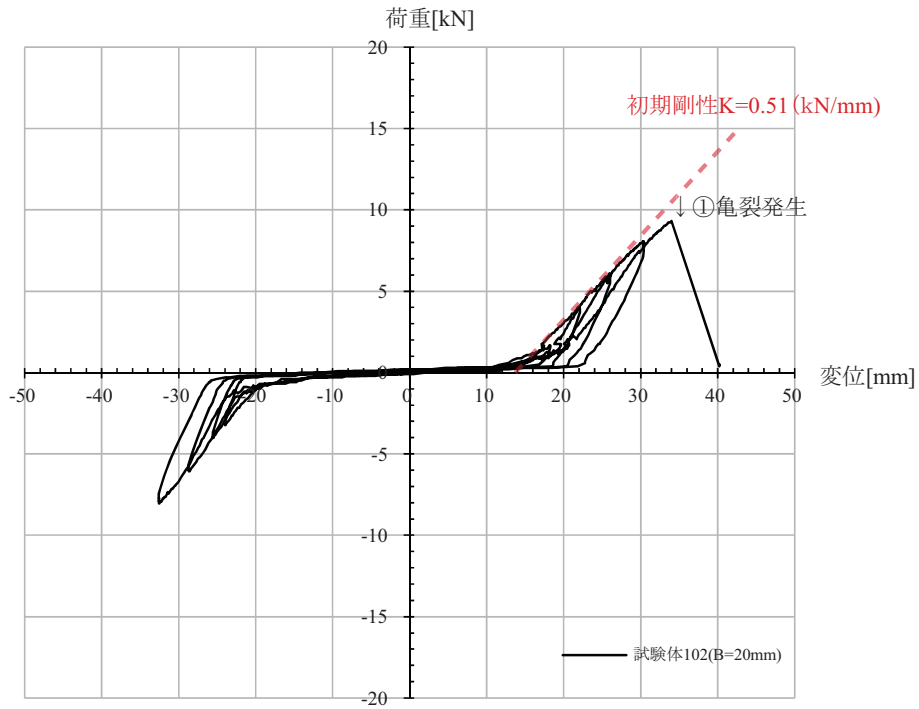


図 40: 面内荷重変形曲線

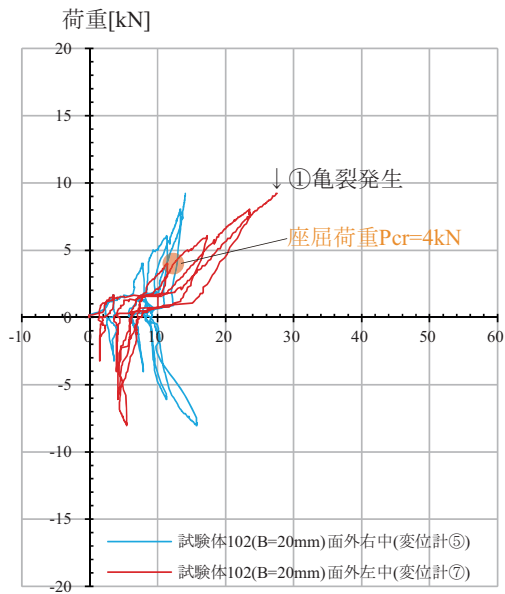


図 41: 面外荷重変形曲線 (鋼材)

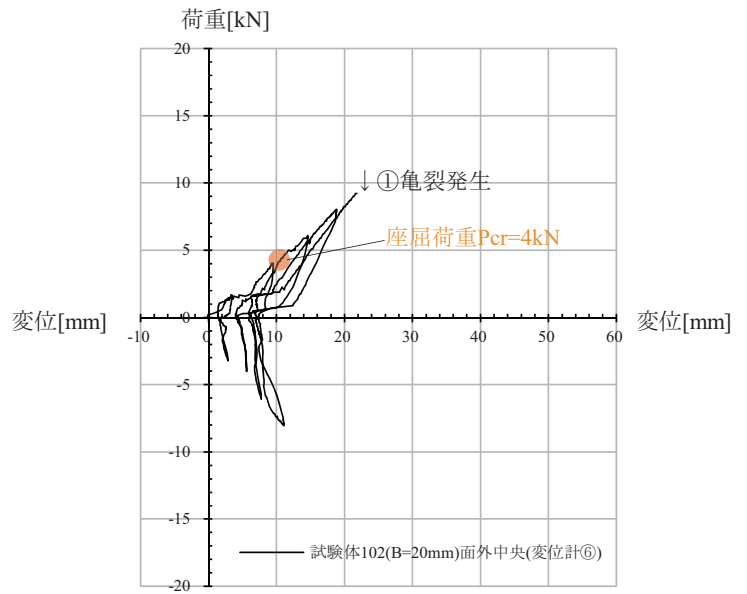


図 42: 面外荷重変形曲線 (ガラス)

■ 試験体 103(B=24mm) の実験結果

試験体 103 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 45 から、試験体 101,102 と同様に、スリップ量は 15mm 程度、初期剛性は試験体 101,102 よりもまた少々大きくなり、概ね 0.54kN/mm 程度で荷重は上昇し、3 サイクル目負方向載荷時に変形がスリップを含め-40mm、最大耐力-8kN 付近に達したところでガラスが破損していることがわかる。(図 43,44)

次に、面外の荷重変形曲線の図 46,47 より、鋼材およびガラスについても 5kN 付近で座屈しているとみなすことができる。



図 43: 試験体 103(B24) 損傷写真

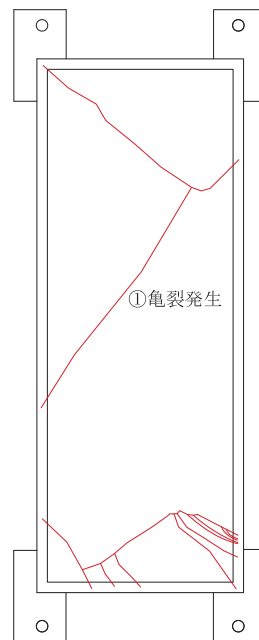


図 44: 試験体 103 損傷状況

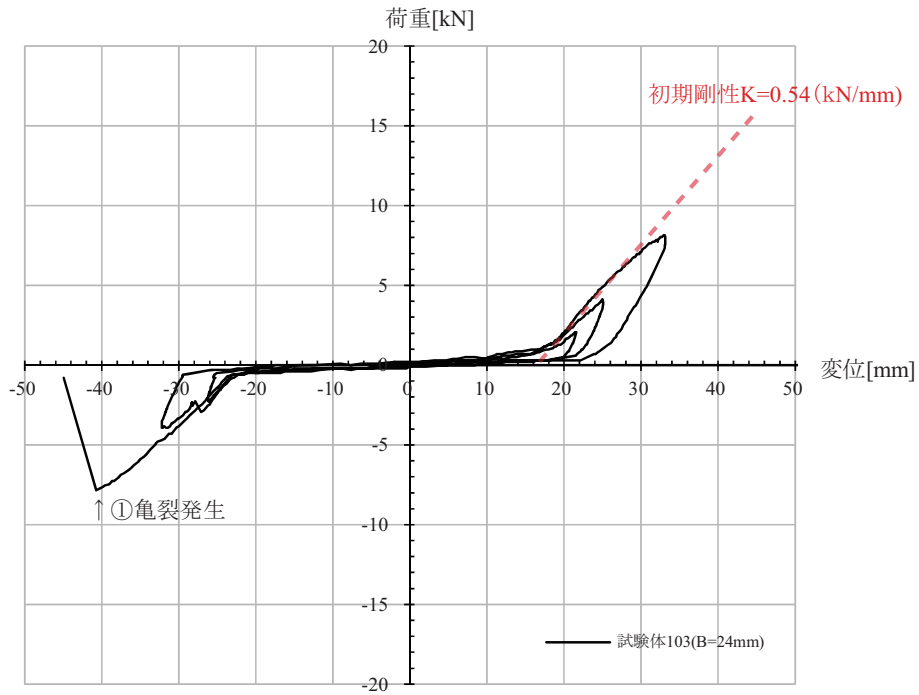


図 45: 面内荷重変形曲線

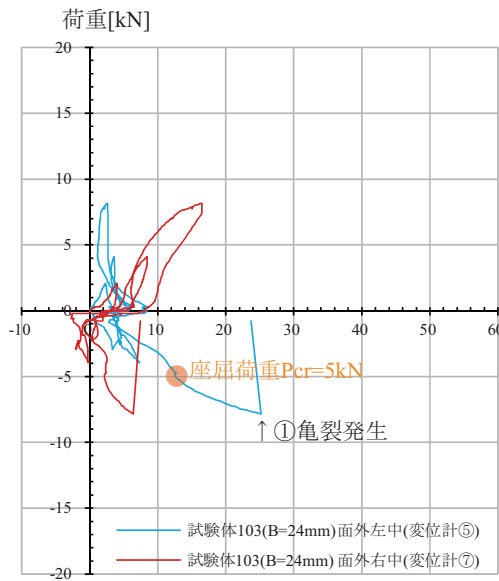


図 46: 面外荷重変形曲線 (鋼材)

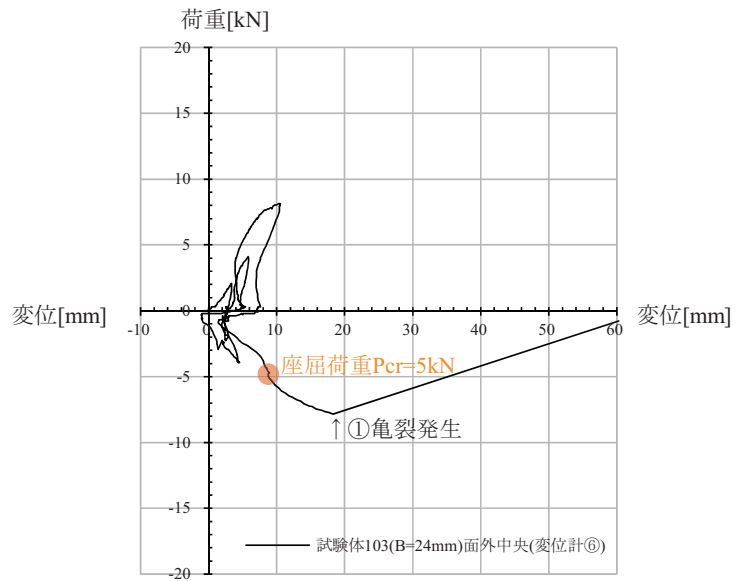


図 47: 面外荷重変形曲線 (ガラス)

### 3.3 要素試験体モデルの線形座屈解析

#### 3.3.1 解析概要

解析は佐藤により作成された解析プログラム HOGAN<sup>24)</sup> を用いて行うものとする。

試験体 101(14mm)、102(20mm)、103(24mm) に対応してフランジ幅  $B=14, 20, 24\text{mm}$  のものを中心に、図 48 のような解析モデルを作成し、フランジ幅  $B=12, 14, 20, 24, 30\text{mm}$  のものについて解析を行う。

解析は実験と同様に荷重点を上部 2 点 (節点 135、142) とし、それぞれに  $0.5tf$  ずつ計  $Q=1tf$  荷重とし、静的解析を行い幾何剛性マトリクスを作成し、線形座屈解析を行う。以下表 6 に入力した部材の諸元を示す。

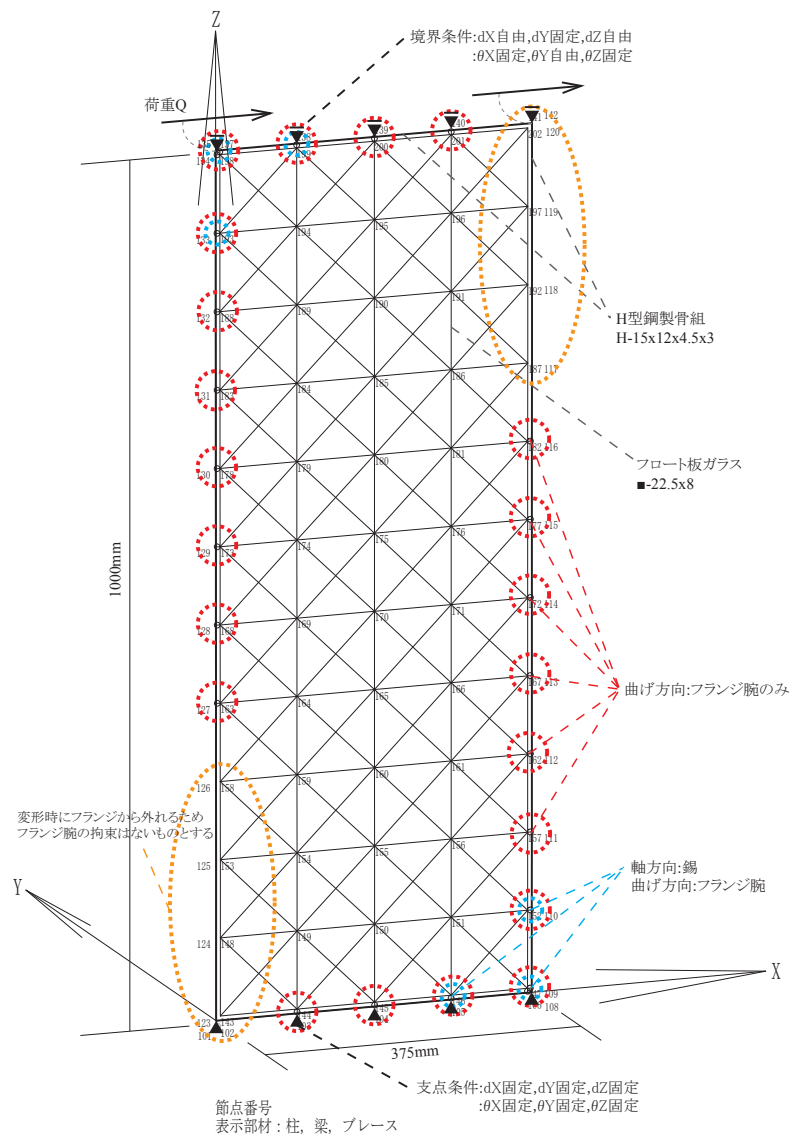


図 48: 解析モデル例 (フランジ幅 12mm の場合のモデル)

表 6: 詳細解析モデル Unit100 の諸元

| 解析モデル名  | 材質                           | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|---------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|         |                              |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Unit101 | H 型鋼製骨組<br>H-15x12x4.5x3     | 20,5000                    | A(mm <sup>2</sup> )   | 112.50                      |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 932.34                      |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 2919.38                     |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 489.38                      |
|         | フロート板ガラス<br>■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|         | 錫フランジ部材<br>BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         | フランジ部材<br>(剛体)               | -                          | A(mm <sup>2</sup> )   | 0                           |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
| Unit102 | H 型鋼製骨組<br>H-15x14x4.5x3     | 20,5000                    | A(mm <sup>2</sup> )   | 124.50                      |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 1440.34                     |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 3360.38                     |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 525.38                      |
|         | フロート板ガラス<br>■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|         | 錫フランジ部材<br>BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         | フランジ部材<br>(剛体)               | -                          | A(mm <sup>2</sup> )   | 0                           |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |



| 解析モデル名  | 材質                           | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                   |
|---------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| Unit103 | H 型鋼製骨組<br>H-15x20x4.5x3     | 20,5000                    | A(mm <sup>2</sup> )   | 160.50            |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 4068.34           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 4683.38           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 633.38            |
|         | フロート板ガラス<br>■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0             |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0             |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0            |
|         | 錫フランジ部材<br>BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                 |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         | フランジ部材<br>(剛体)               | -                          | A(mm <sup>2</sup> )   | 0                 |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                 |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
| Unit104 | H 型鋼製骨組<br>H-15x24x4.5x3     | 20,5000                    | A(mm <sup>2</sup> )   | 184.50            |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 6980.34           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 5565.38           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 705.38            |
|         | フロート板ガラス<br>■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0             |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0             |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0            |
|         | 錫フランジ部材<br>BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                 |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         | フランジ部材<br>(剛体)               | -                          | A(mm <sup>2</sup> )   | 0                 |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                 |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                 |

| 解析モデル名  | 材質                           | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|---------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|         |                              |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Unit105 | H型鋼製骨組<br>H-15x30x4.5x3      | 20,500                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 220.50                      |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 13568.34                    |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 6888.38                     |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 813.38                      |
|         | フロート板ガラス<br>■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|         | 錫フランジ部材<br>BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         | フランジ部材<br>(剛体)               | -                          | A(mm <sup>2</sup> )   | 0                           |
|         |                              |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|         |                              |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|         |                              |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |

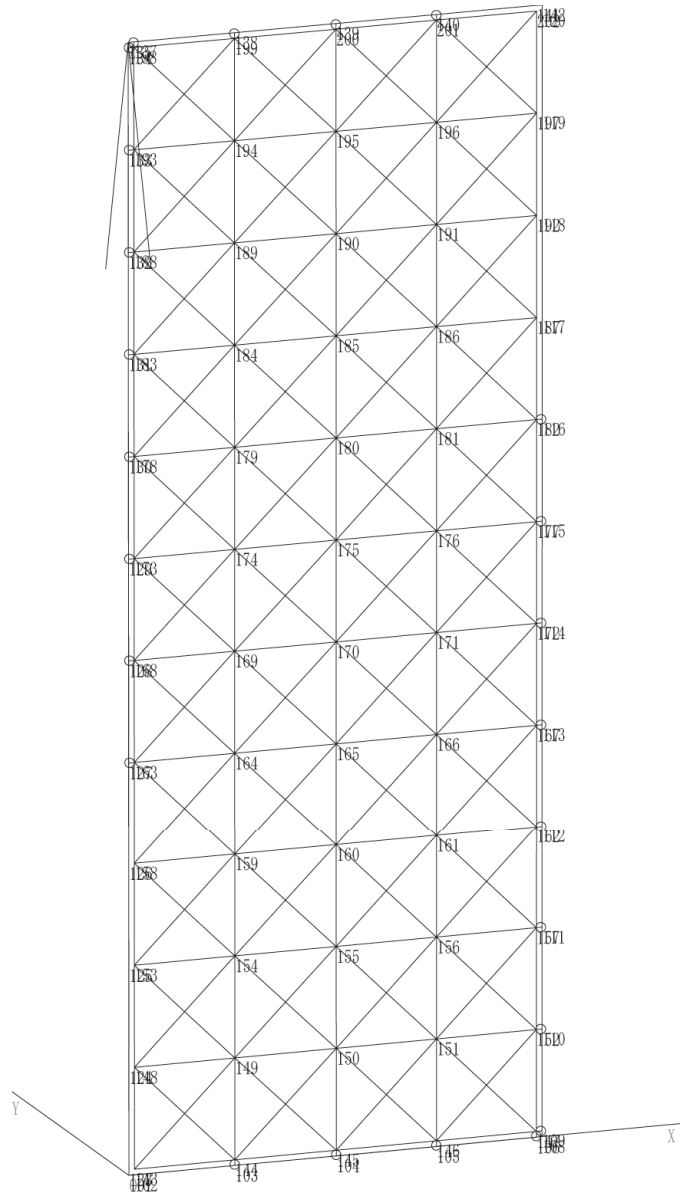
### 3.3.2 解析結果

線形座屈解析を行った結果を以下に示す。

ただし、変形図、座屈モード図ともに変形を3倍で表示している。また軸力図、せん断力図中の数値は tf を、曲げモーメント図は tf·m を表す。

#### ■Unit101 の解析モデルと解析結果

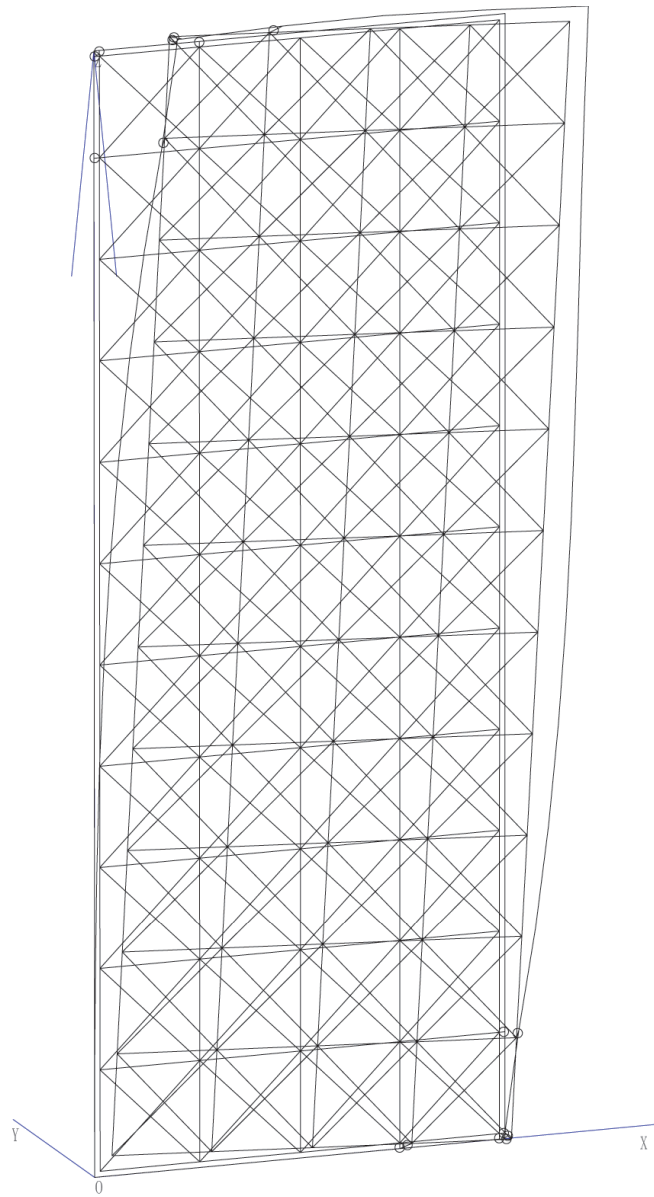
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 49: Unit101 解析モデル図

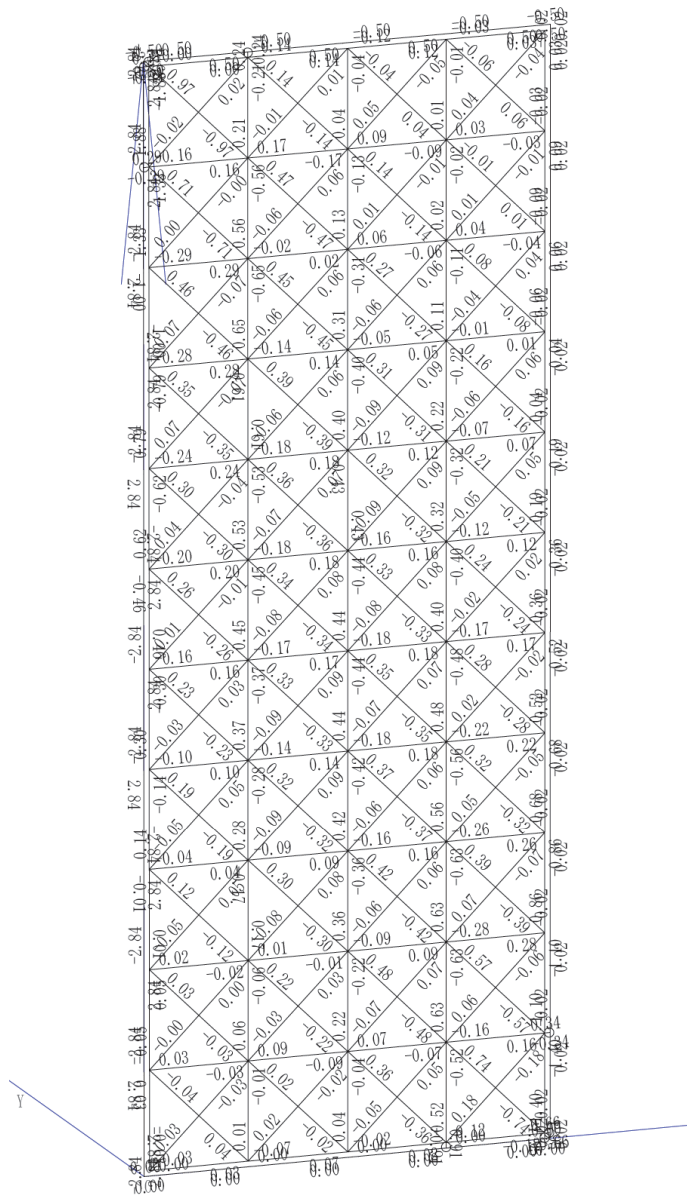
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 50: Unit101 の変形図

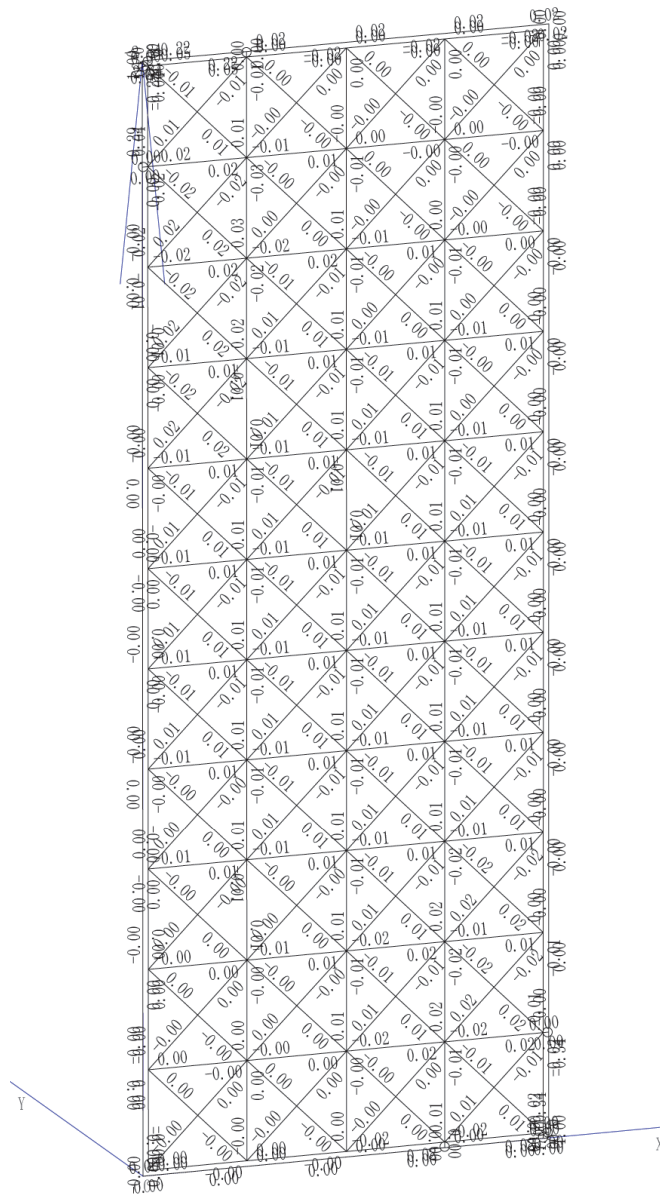
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 51: Unit101 の軸力図

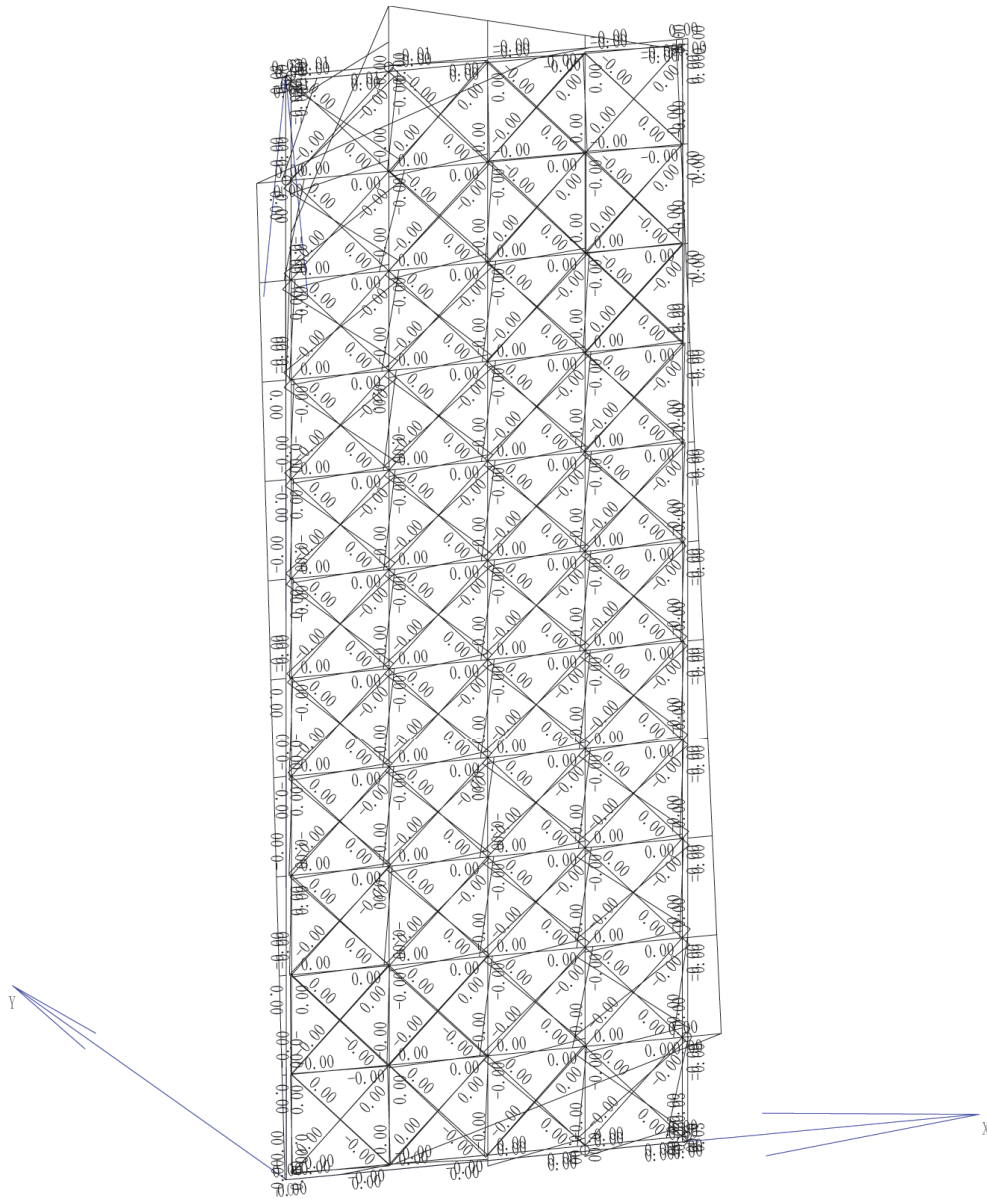
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 52: Unit101 のせん断力図

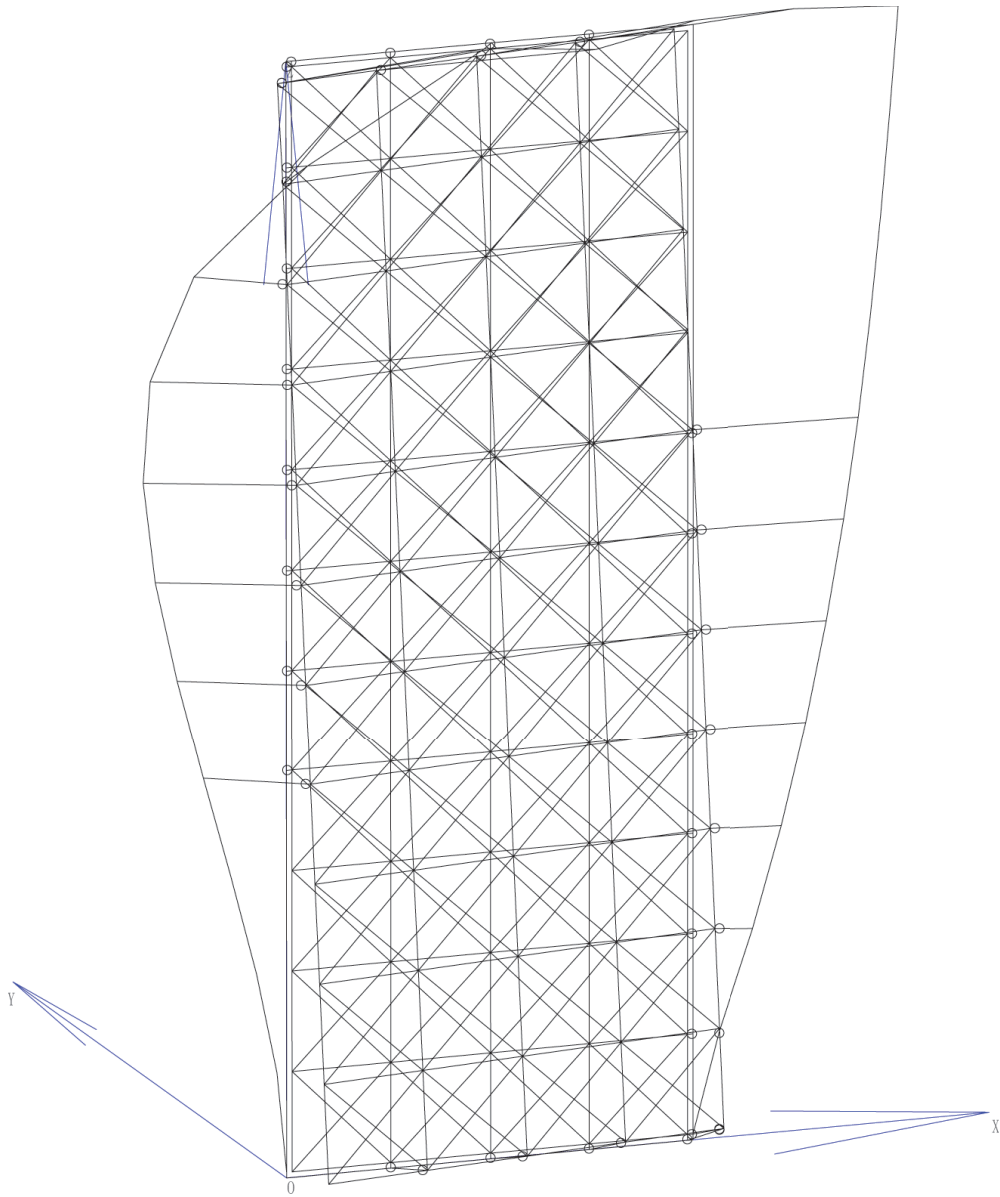
曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 53: Unit101 の曲げモーメント図

座屈モード図



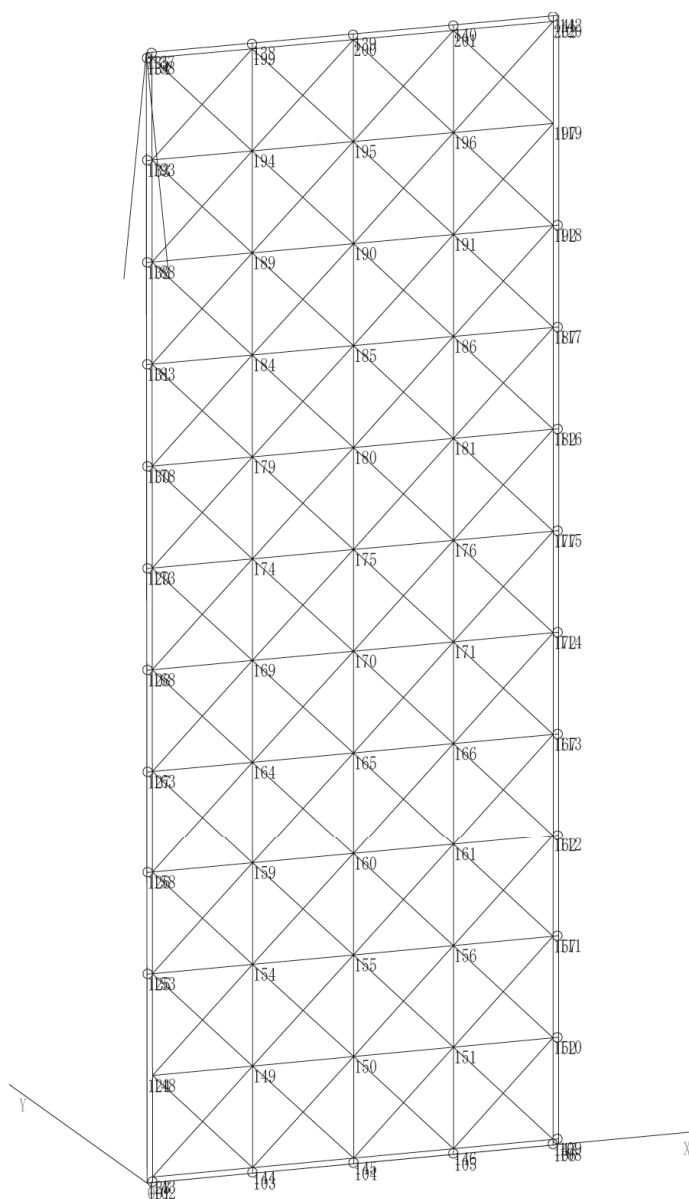
変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 54: Unit101 の座屈モード図



■Unit102 の解析モデルと解析結果

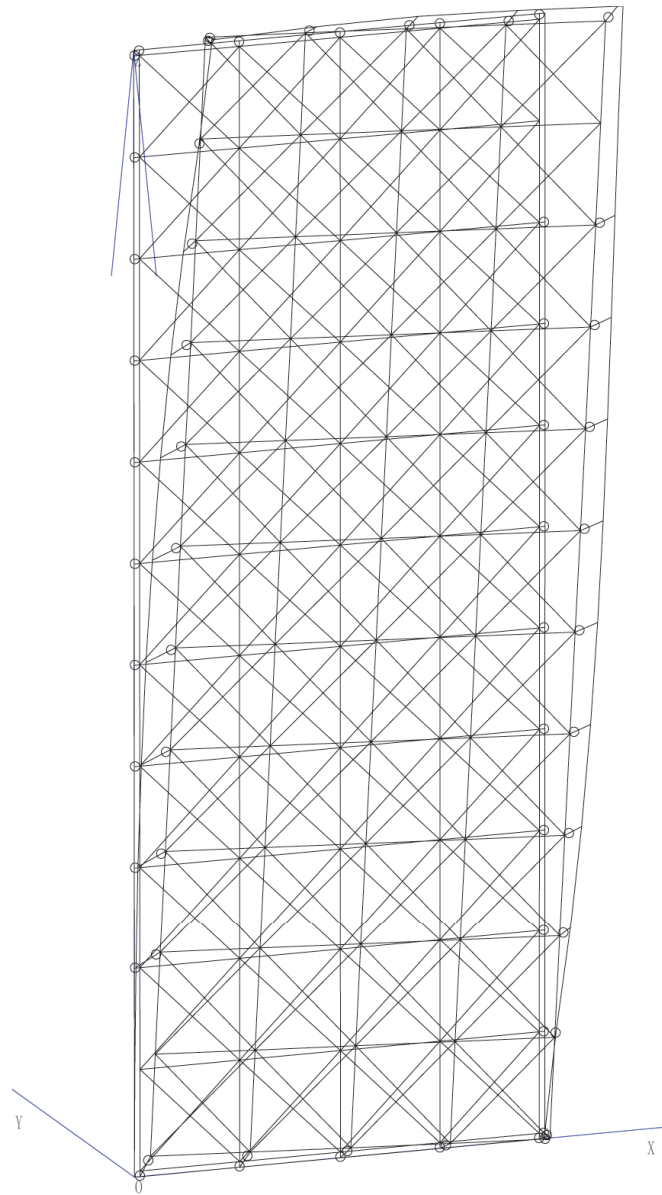
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 55: Unit102 解析モデル図

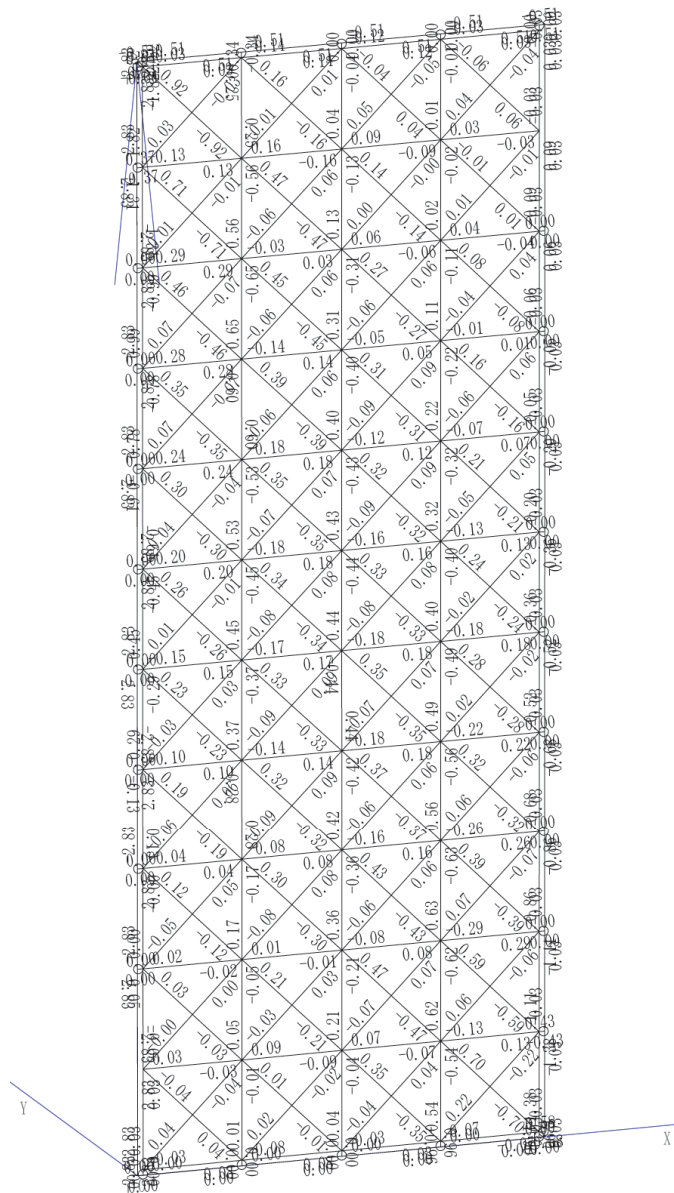
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 56: Unit102 の変形図

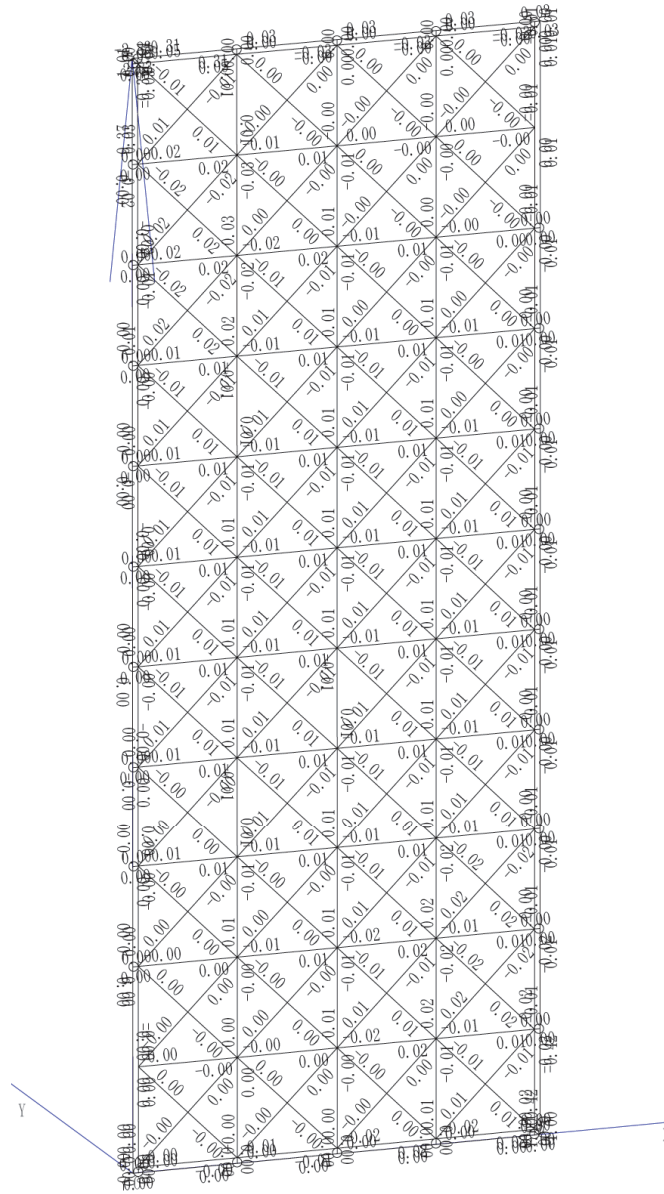
軸力図



軸力 [kf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 57: Unit102 の軸力図

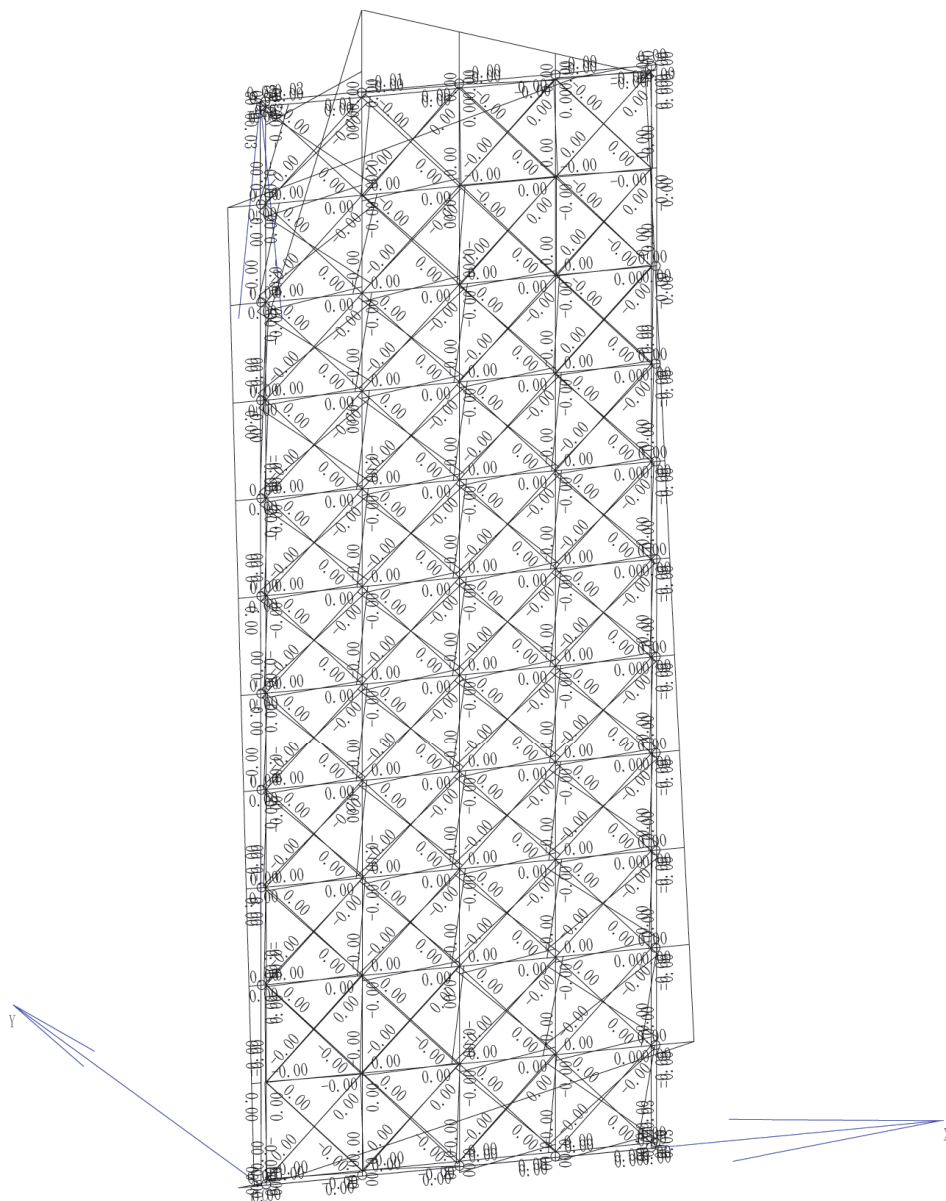
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 58: Unit102 のせん断力図

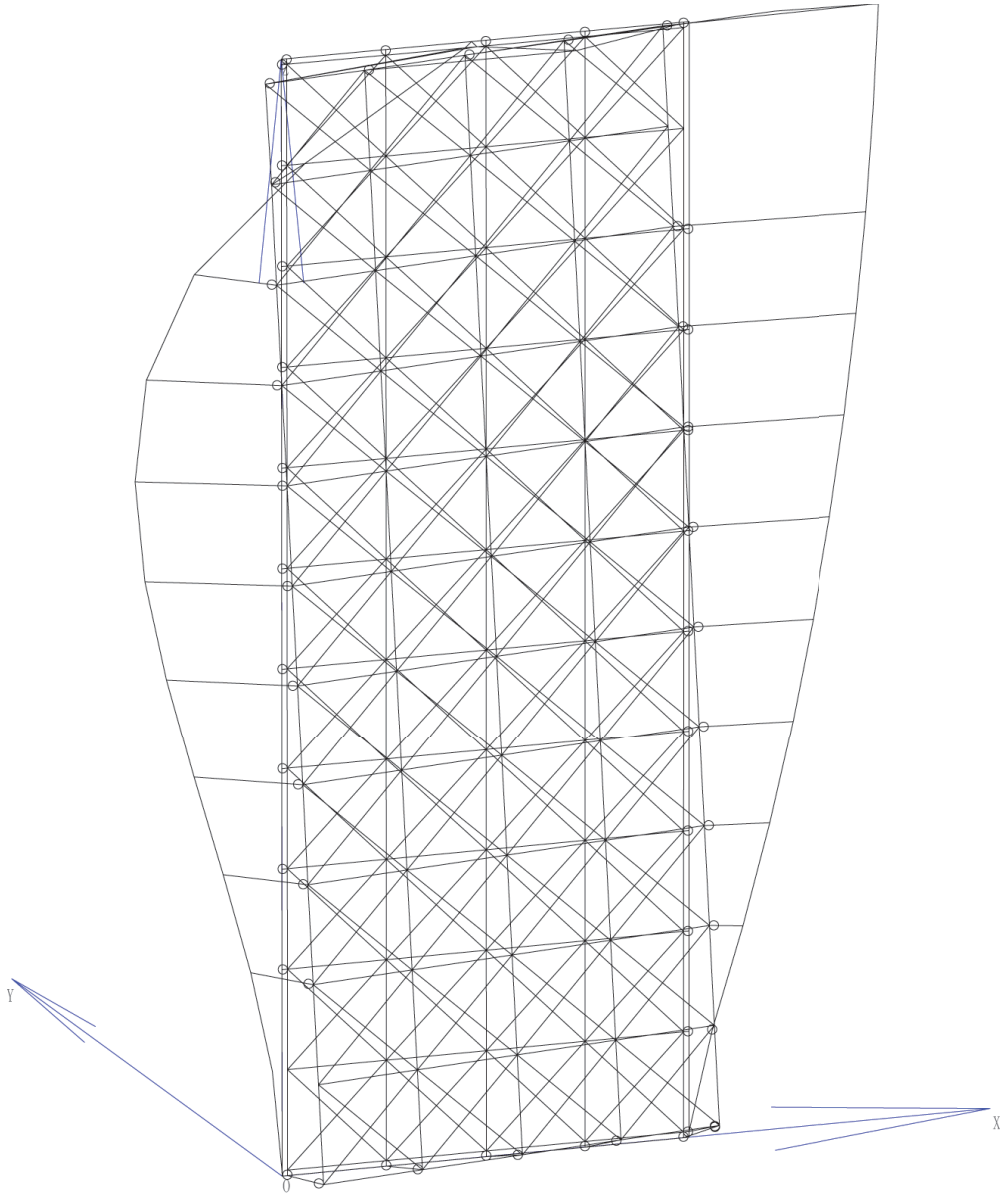
曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 59: Unit102 の曲げモーメント図

座屈モード図

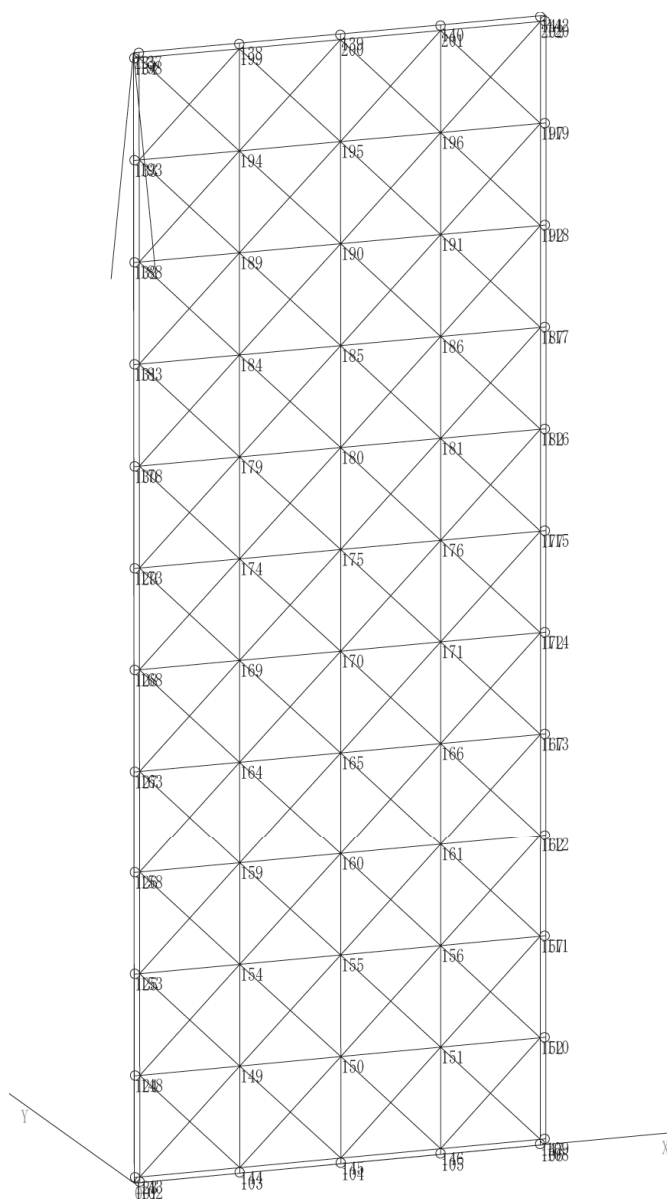


変形図  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 60: Unit102 の座屈モード図

■Unit103の解析モデルと解析結果

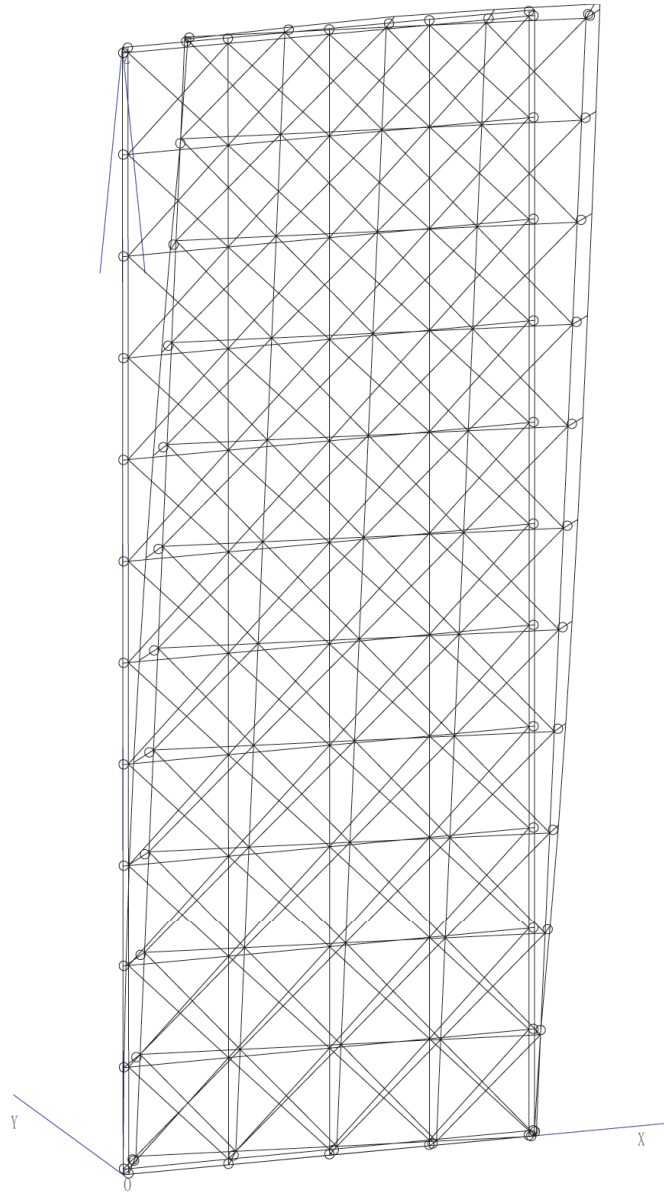
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 61: Unit103 解析モデル図

変形図

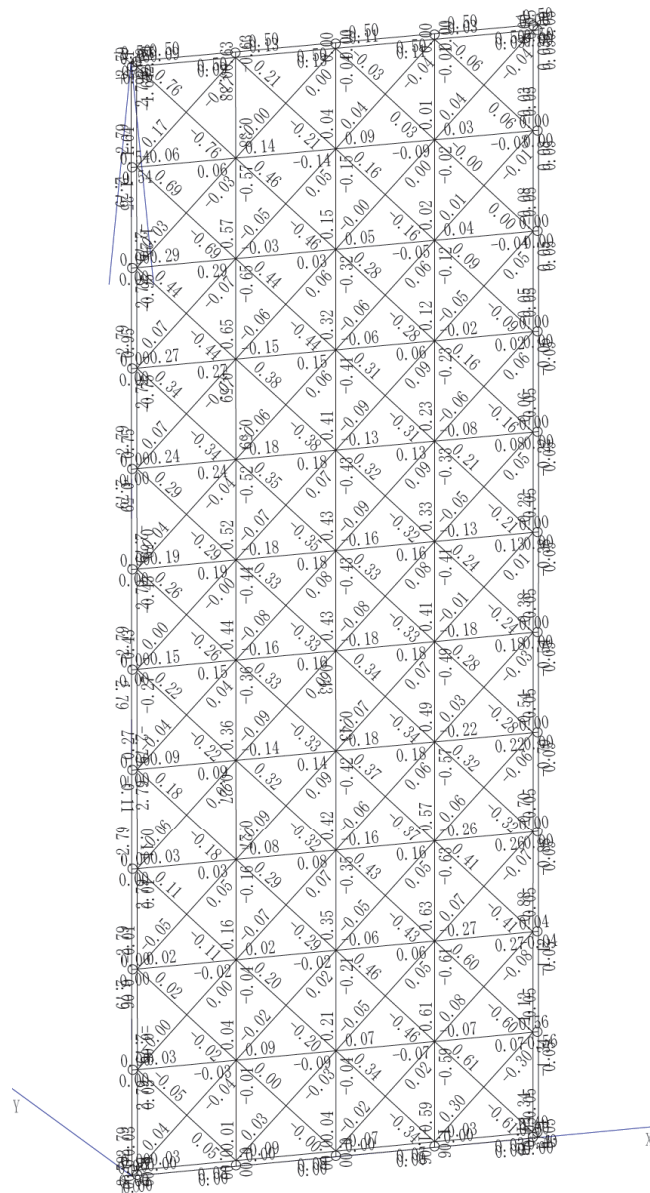


変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 62: Unit103 の変形図



軸力図

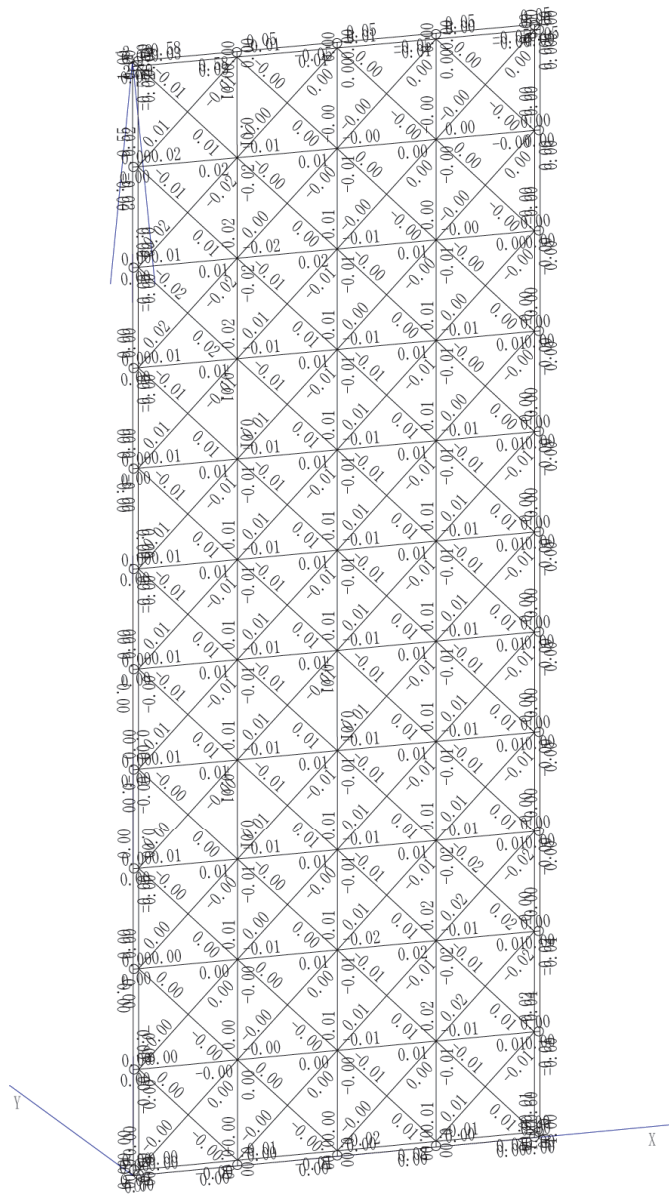


軸力 [tf]

表示部材: 柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 63: Unit103 の軸力図

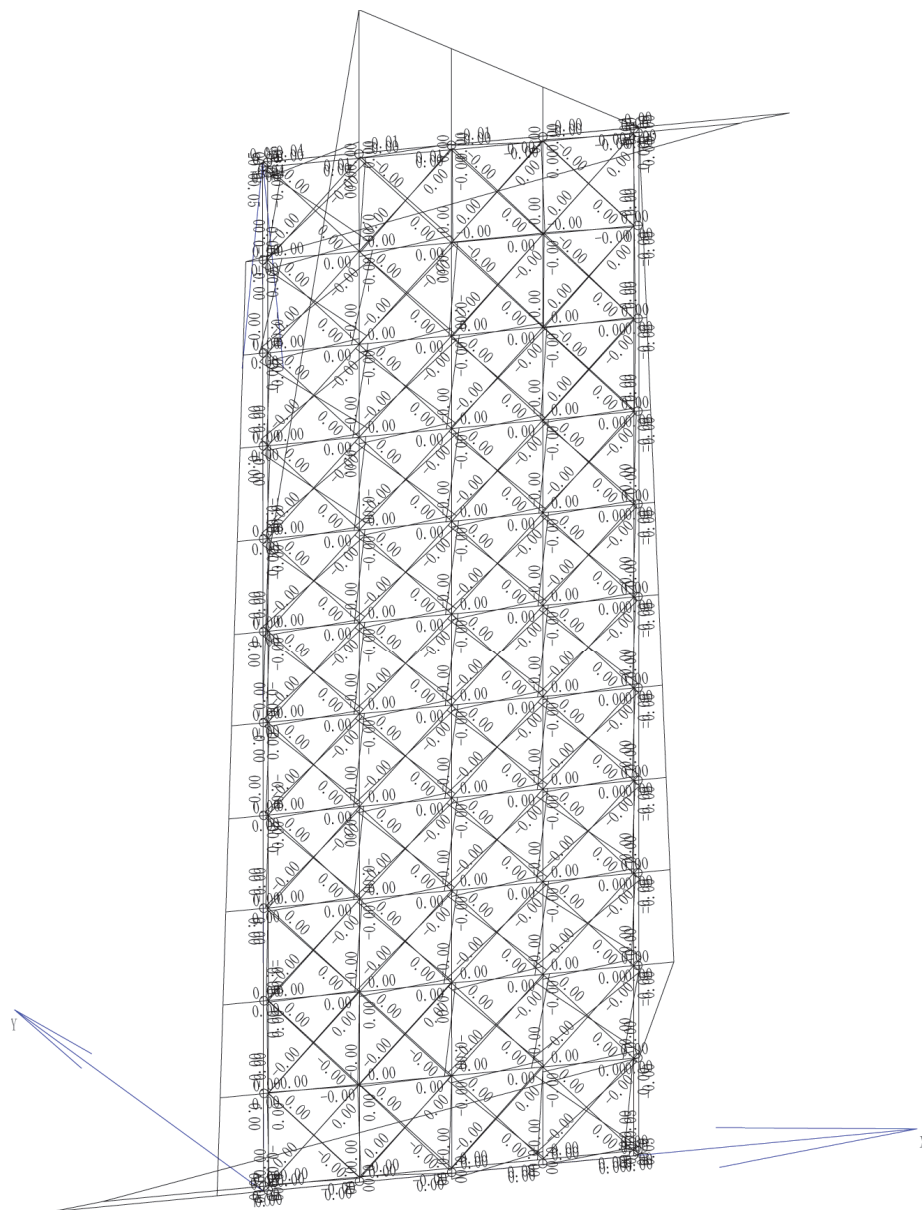
せん断力図



せん断力 [kN]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

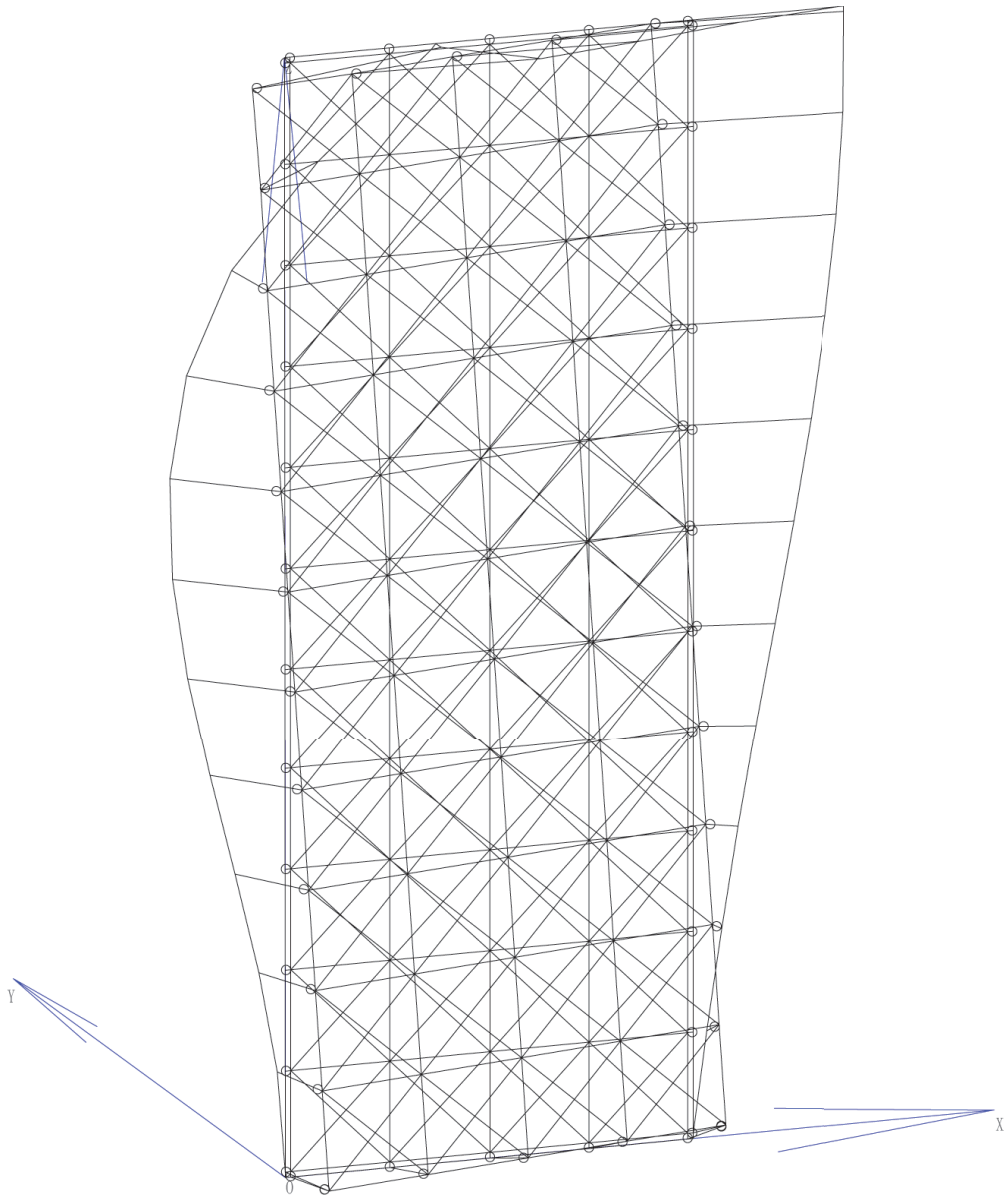
図 64: Unit103 のせん断力図

曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床  
図 65: Unit103 の曲げモーメント図

座屈モード図

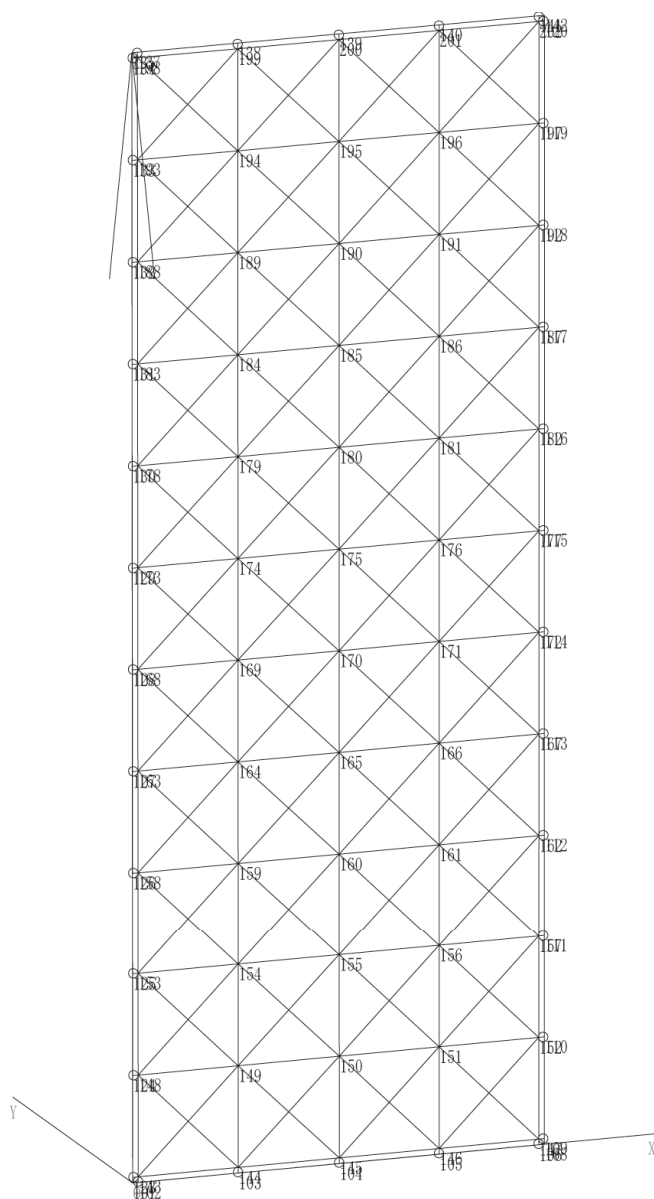


変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 66: Unit103 の座屈モード図

■Unit104 の解析モデルと解析結果

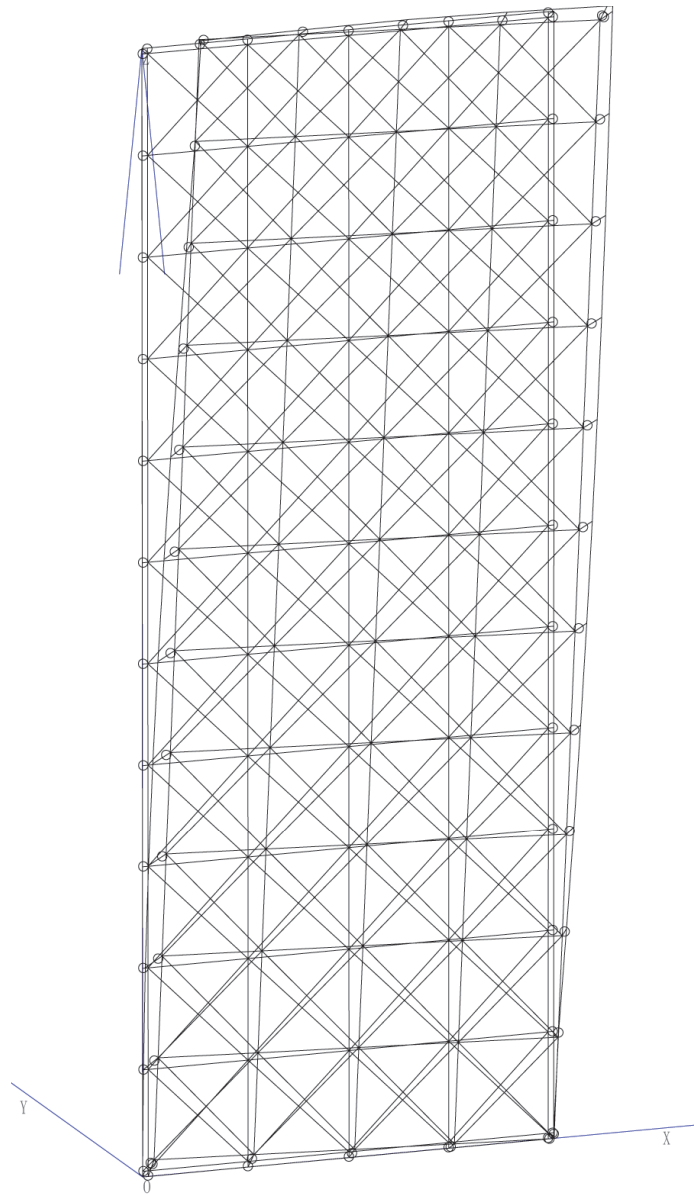
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 67: Unit104 解析モデル図

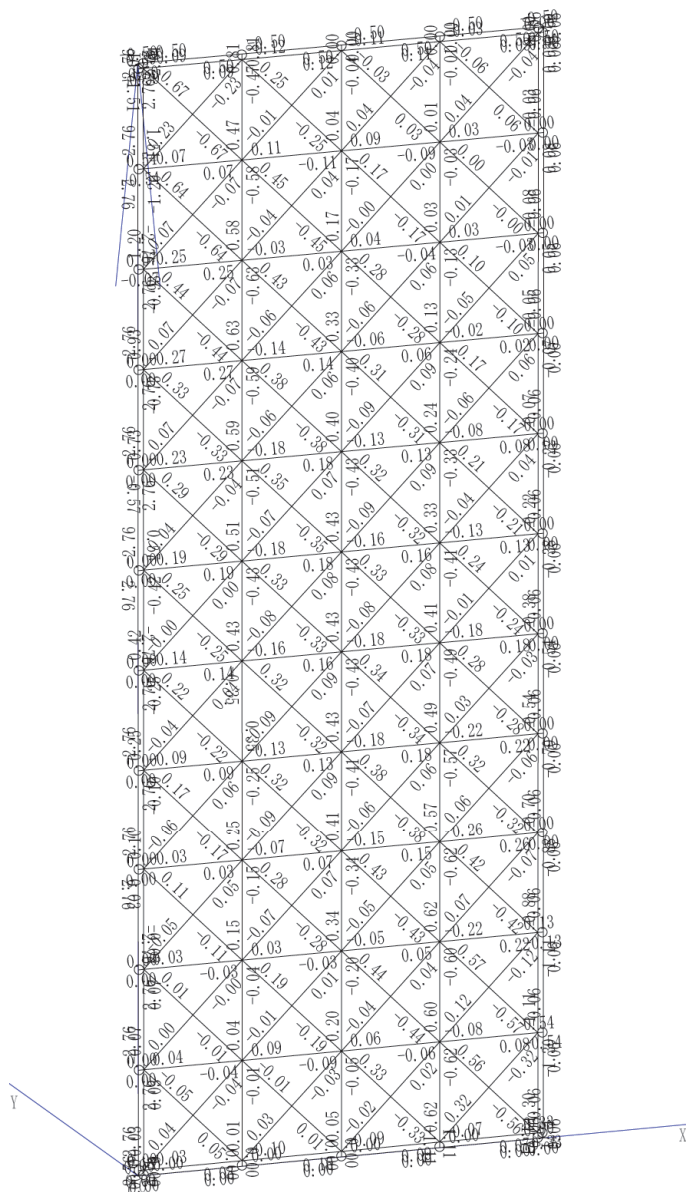
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 68: Unit104 の変形図

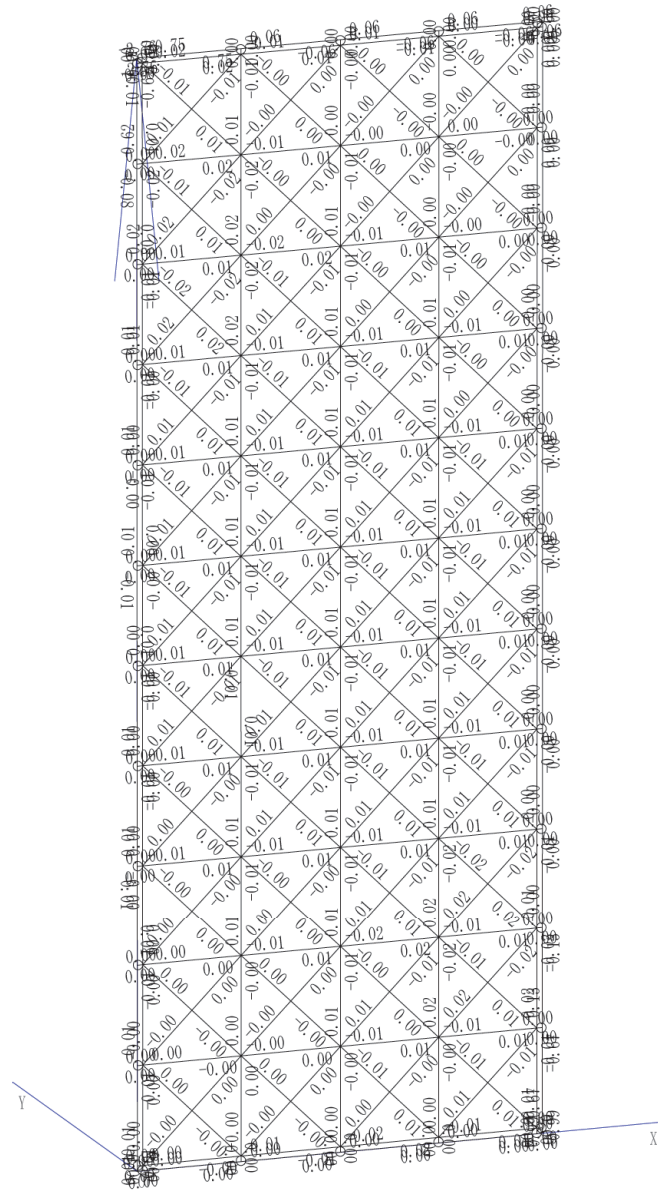
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 69: Unit104 の軸力図

せん断力図

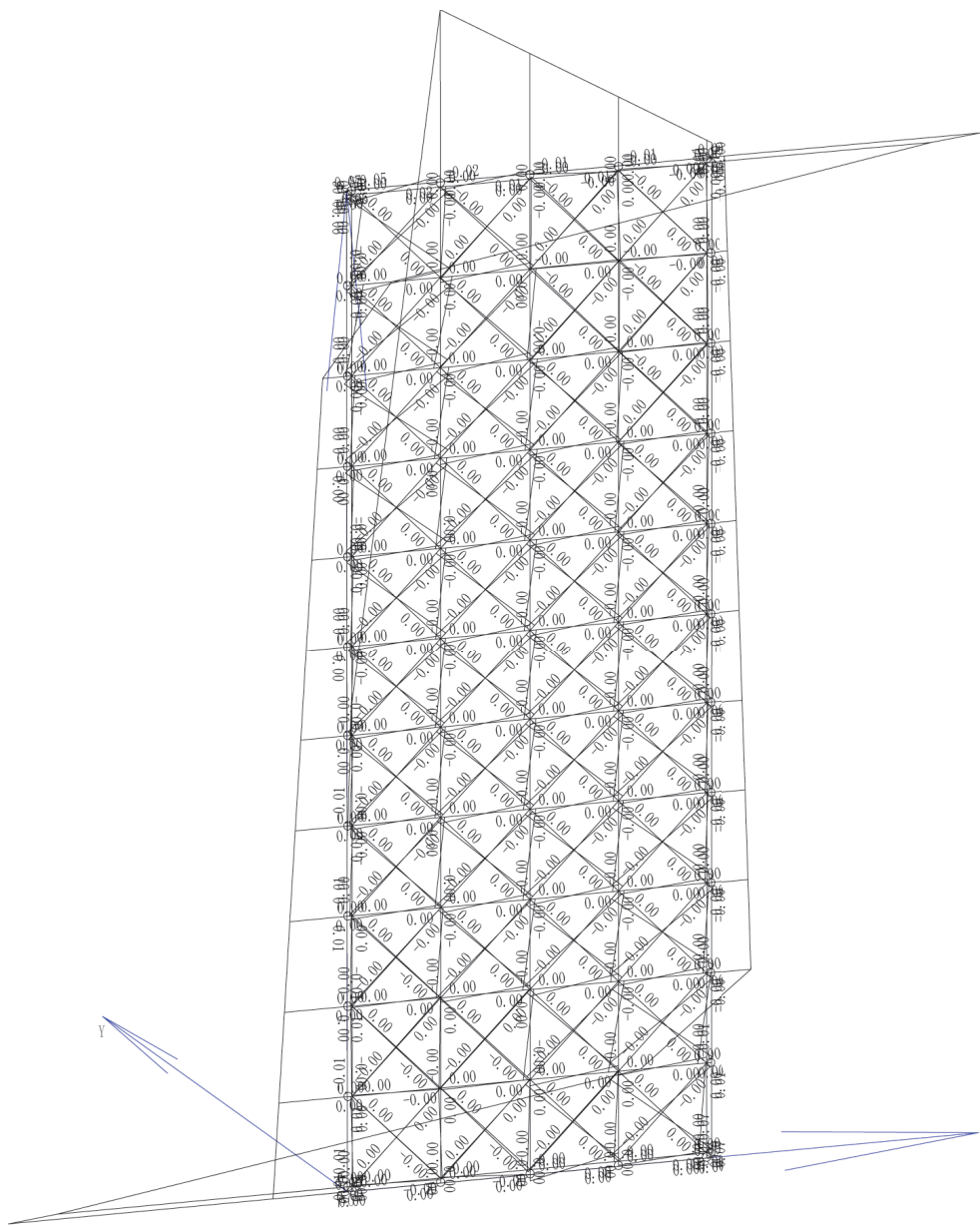


せん断力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 70: Unit104 のせん断力図



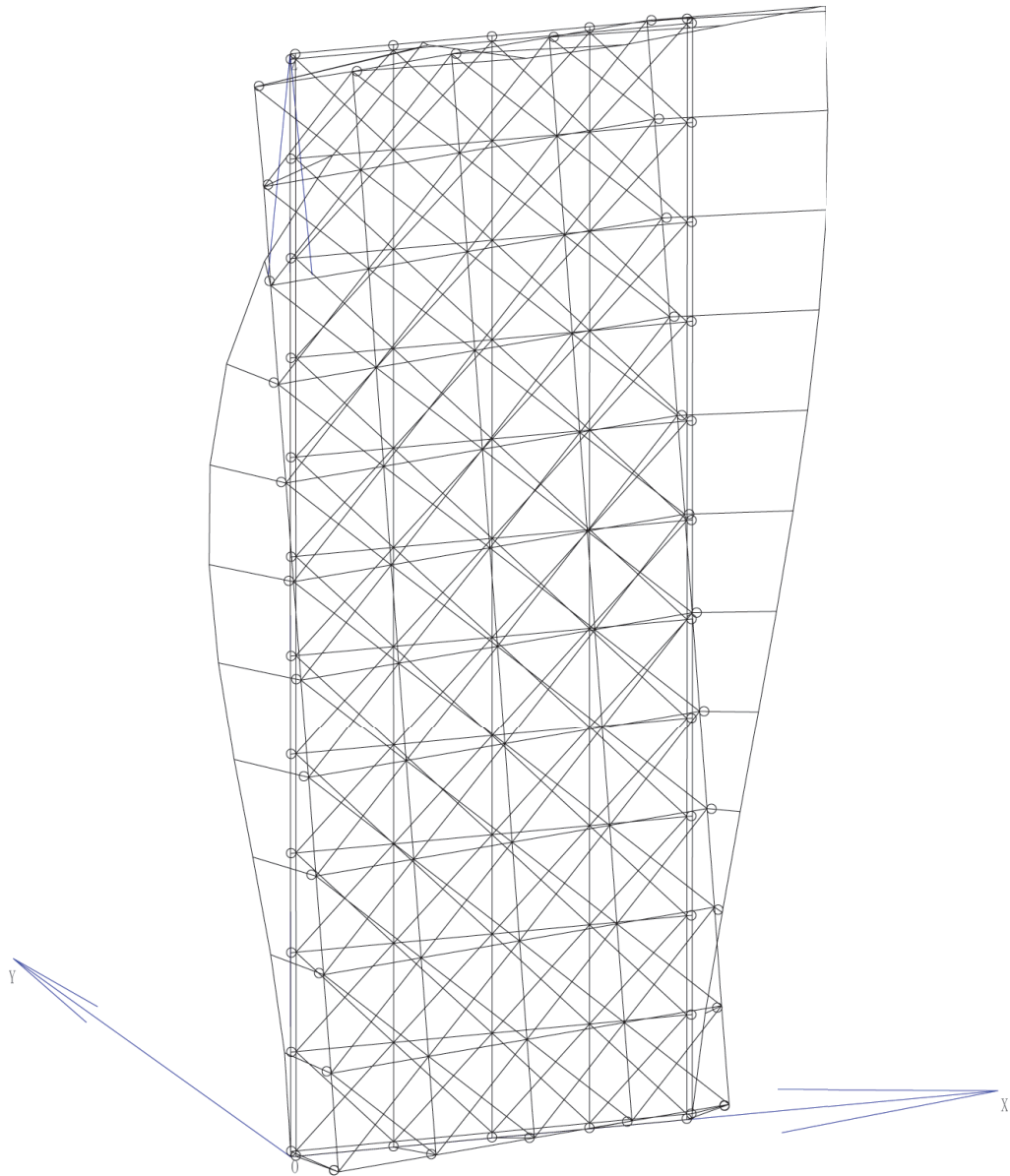
曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 71: Unit104 の曲げモーメント図

座屈モード図

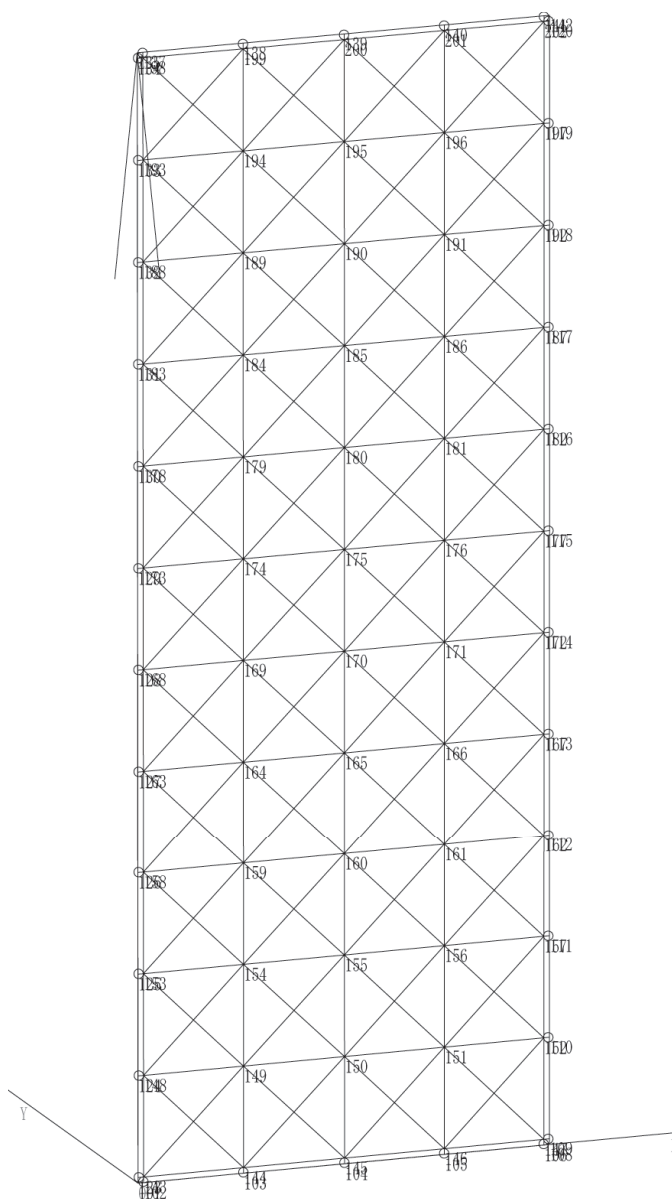


変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 72: Unit104 の座屈モード図

■Unit105 の解析モデルと解析結果

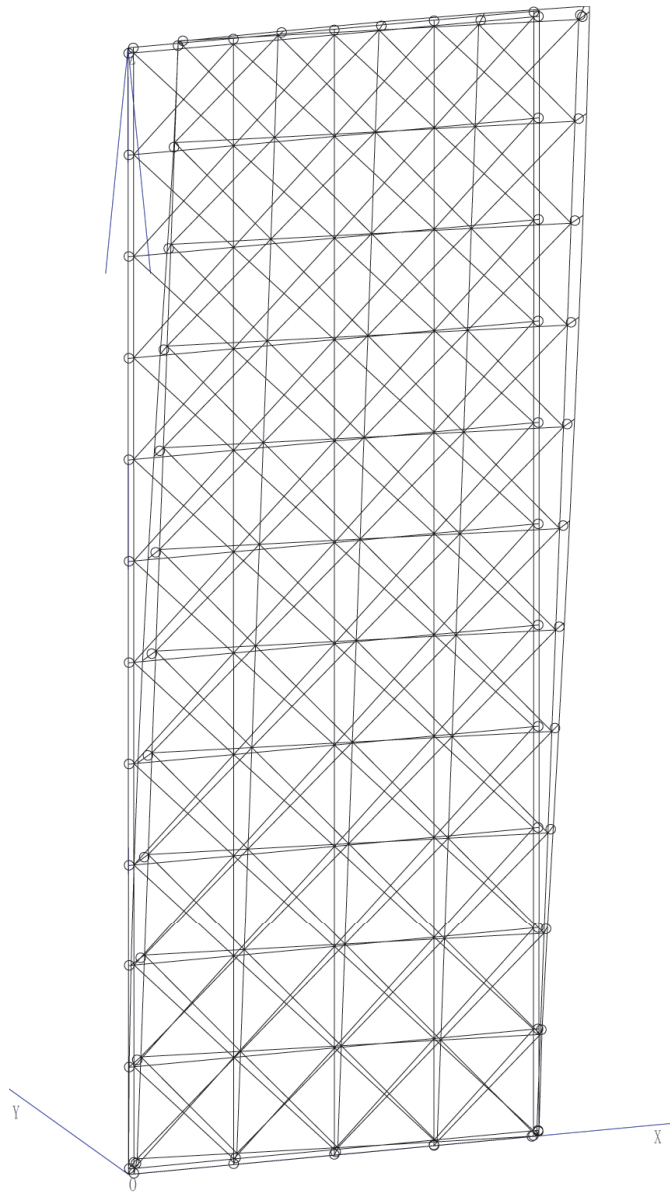
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 73: Unit105 解析モデル図

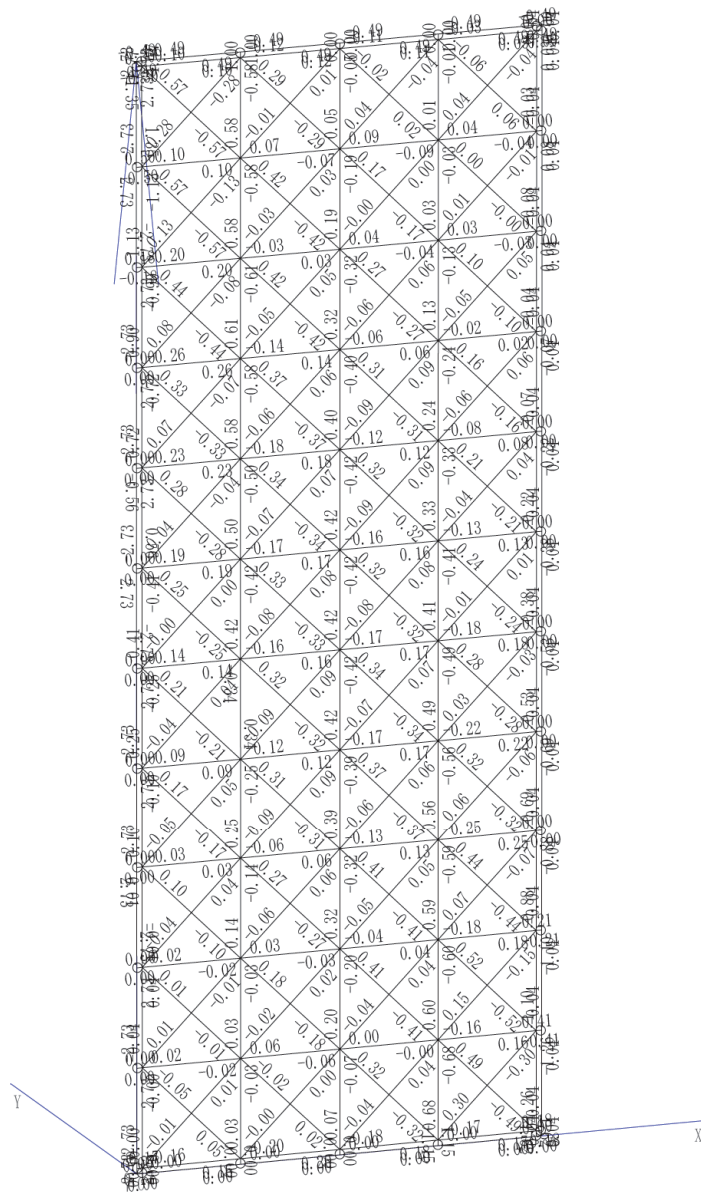
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 74: Unit105 の変形図

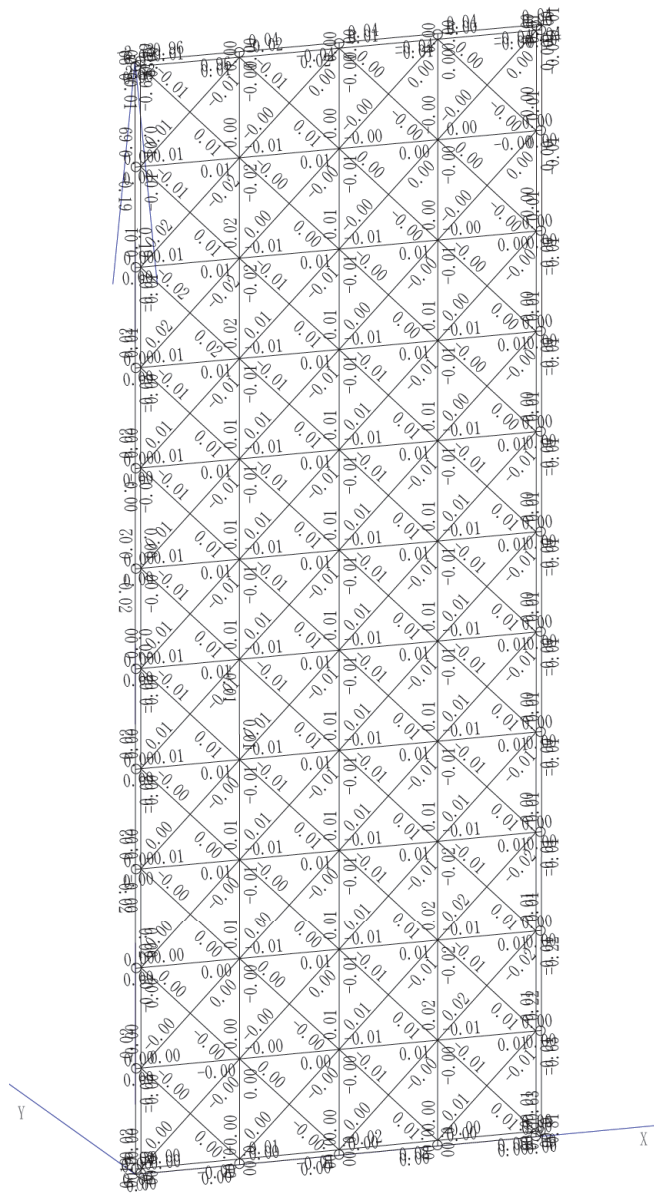
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 75: Unit105 軸力図

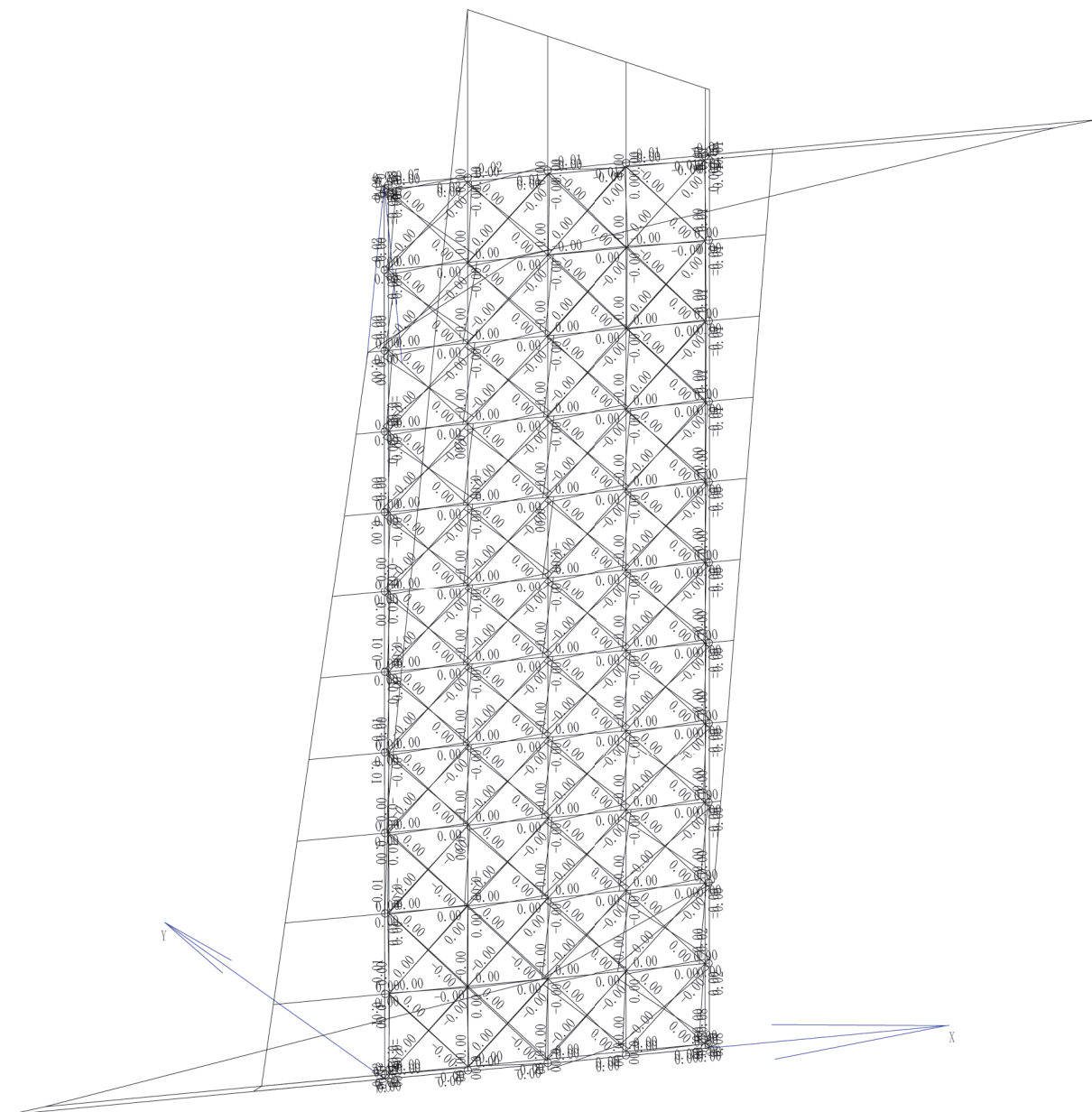
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱, 梁, ブレース, 壁, 床

図 76: Unit105 のせん断力図

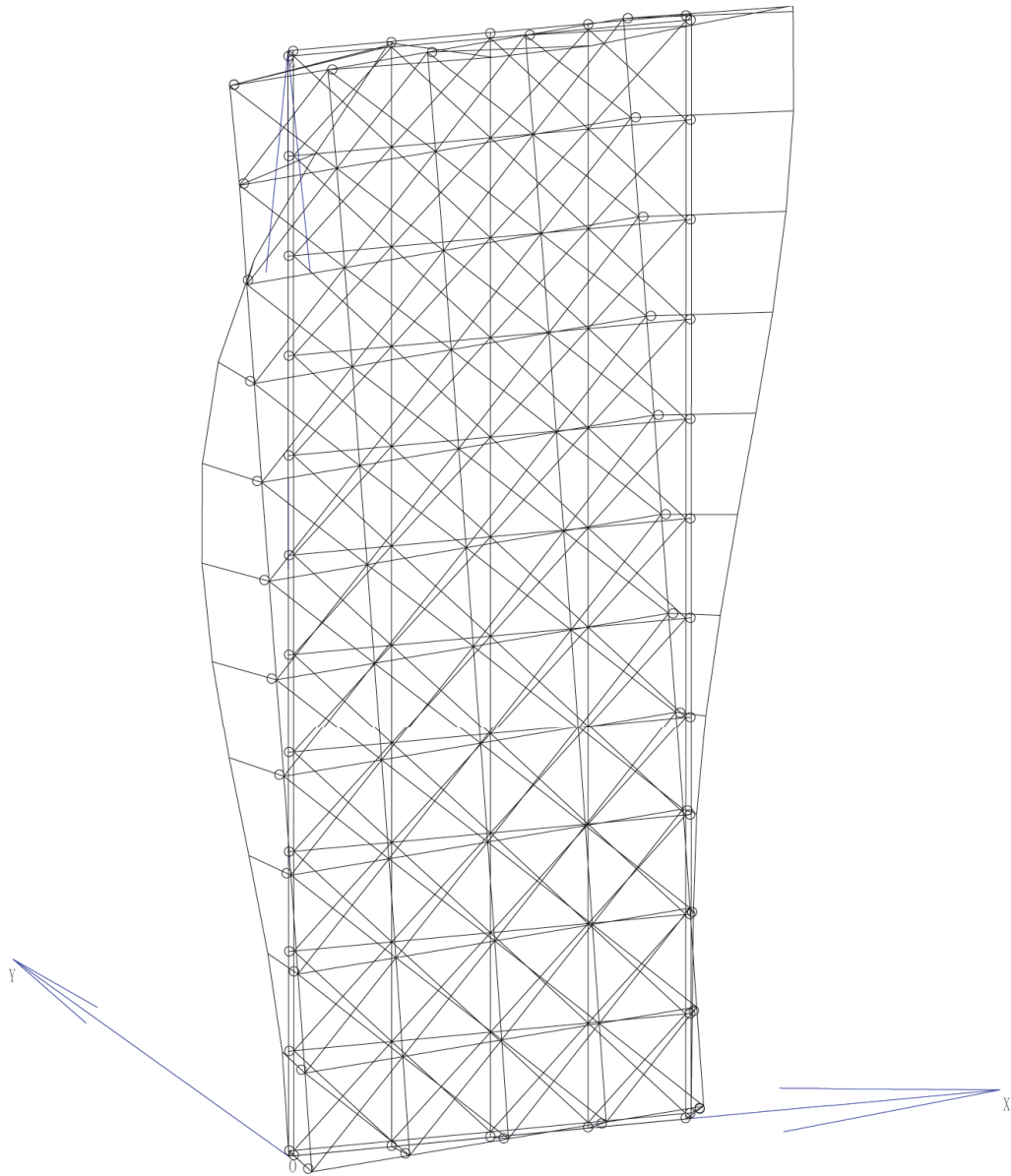
曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 77: Unit105 の曲げモーメント図

座屈モード図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 78: Unit105 の座屈モード図



### 3.4 実験結果と解析結果の分析と考察

解析結果から、まずこのモデル化が妥当であるかについて変形図や軸力図、曲げモーメント図から考察する。

すべての軸力図 51,57,63,69,75 でガラスの左上部と右下部に軸力が集中し右上部と左下部でほとんど軸力を負担していないことからガラスは圧縮ブレースとして働いていることもモデル化されており、ガラスの浮き上がりも再現できていると考えられる。

また座屈モード図より、圧縮側の鋼材が面内にはらみだす形の座屈モードとなっているが、試験体 101-103 の実験においては、ガラスは外れこしないが圧縮側の鋼材は面内に変形しながら面外にはらみ出し、面内の荷重変形曲線の勾配が小さくなる点と面外の荷重変形曲線の勾配が小さくなる点はほぼ同程度の荷重で起こっていることから、この座屈解析の結果得られる座屈固有値から算出した座屈荷重を試験体の座屈荷重と考えることも妥当であると考えられ、総じてこのモデル化と解析結果は実現象に照らしても妥当といえよう。

さて要素試験体の実験結果と解析結果について、フランジ幅  $B$  と座屈荷重  $P_{cr}$  の関係およびフランジ幅  $B$  と初期剛性  $K$  の関係を、以下の表 7 にまとめる。なお座屈荷重  $P_{cr}$  の単位は  $kN$ 、初期剛性  $K$  の単位は  $kN/mm$  である。

表 7: 要素試験体の実験結果と解析結果

| フランジ幅 $B(mm)$ | $P_{cr}$ (実験値) | $P_{cr}$ (解析値) | $K$ (実験値) | $K$ (解析値) |
|---------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| 12            | -              | 3.46           | -         | 0.38      |
| 14            | 4              | 3.71           | 0.40      | 0.43      |
| 20            | 4              | 4.58           | 0.51      | 0.50      |
| 24            | 5              | 5.13           | 0.54      | 0.55      |
| 30            | -              | 6.41           | -         | 0.64      |

### 3.4.1 フランジ幅 B と座屈荷重 Pcr の関係

まずフランジ幅 B と座屈荷重 Pcr の関係について、図 79 のように、グラフは右肩上がりほぼ線形となっており、座屈荷重は全体としてフランジ幅が大きくなるにつれて緩やかに大きくなる傾向があることがわかる。解析結果についてフランジ幅 B と座屈荷重 Pcr の関係、また鋼製骨組の断面二次モーメント  $I_y$  と座屈荷重 Pcr の関係を実験結果と解析結果についてプロットしたものを以下に示す。なお鋼製骨組の断面二次モーメントは強軸側  $I_y$  でガラスの座屈を補剛すると考えられるため、 $I_y$  と Pcr の関係についてプロットした。

図 79,80 より、実験結果と解析結果の座屈荷重は非常に良い対応を示しているといえる。

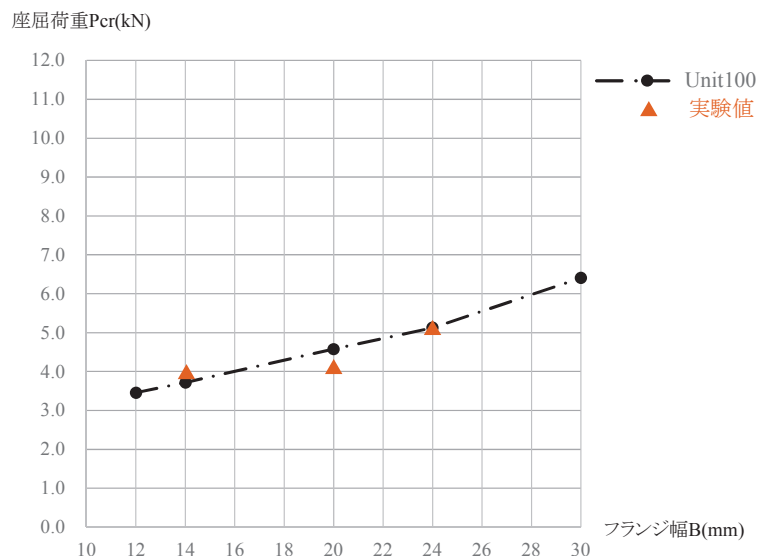


図 79: フランジ幅 B と座屈荷重 Pcr の関係

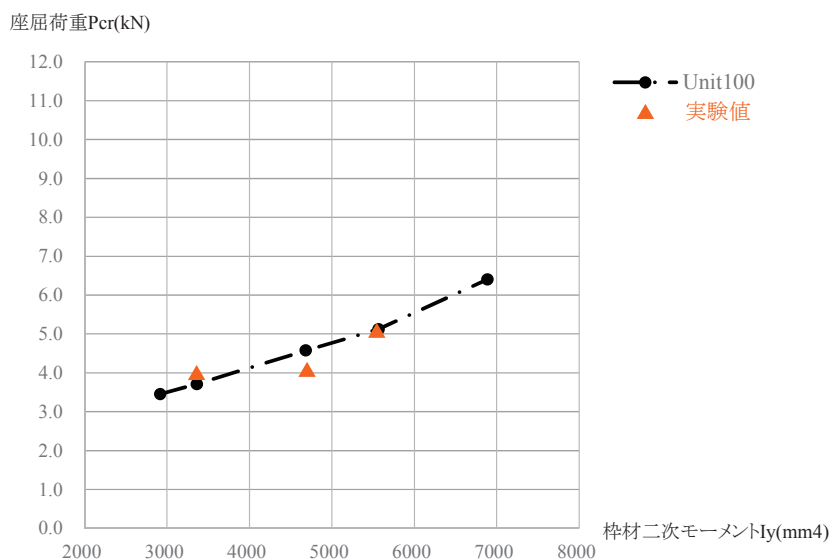


図 80:  $I_y$  と Pcr の関係

### 3.4.2 フランジ幅 B と初期剛性 K の関係

次にフランジ幅 B と初期剛性 K の関係について、実験結果と解析結果についてプロットしたものを以下に示す。図 81 より、実験結果と解析結果の初期剛性も非常に良い対応を示しているといえる。

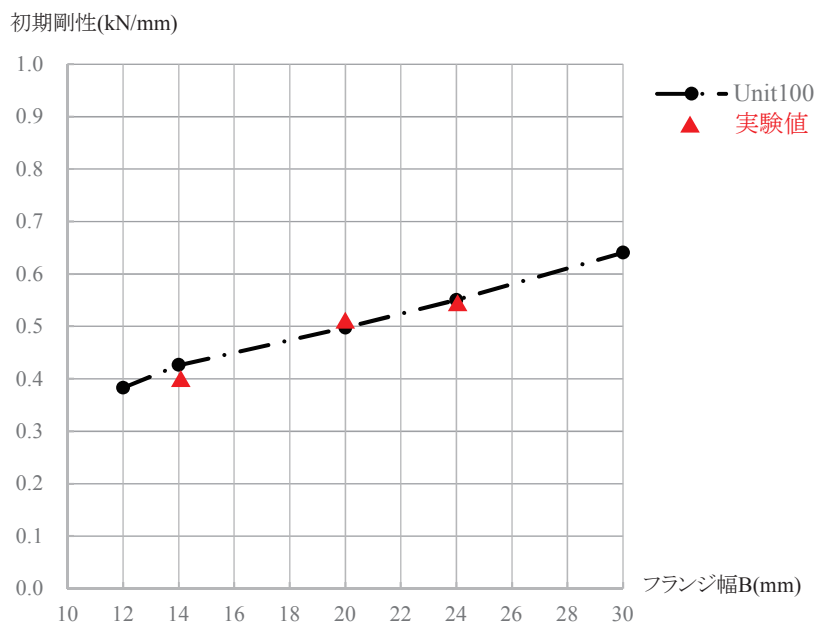


図 81: フランジ幅 B と初期剛性 K の関係

### 3.5 補足的に検討した事項について

本解析において、錫のヤング係数を材料実験の結果を元に図 27 のようにトリリニアとしたが、応力値の小さい錫部材のヤング係数が座屈荷重および初期剛性にどのような影響を与えるかの考察として、錫の圧縮応力が  $\sigma_{tin} \leq 2.5$  においてヤング係数を  $10\text{N/mm}^2$  としたモデル (Unit200 系統) を作成し解析を行った。Unit200 系統の結果を以下に示す。初期剛性について、図 83 より実験値との対応は悪いとはいえないものの図 82 に示すように、座屈荷重が実験値から大きく外れていることがわかる。以上のことから、応力値の小さい錫部材のヤング係数は初期剛性には大きな影響はないが、座屈荷重に対する影響は大きいといえる。

次章で行うⅡ型試験体の解析は Unit100 系統で行ったように、錫の圧縮応力が  $\sigma_{tin} \leq 2.5$  においてヤング係数を  $5\text{N/mm}^2$  としたモデルを作成し行うものとする。

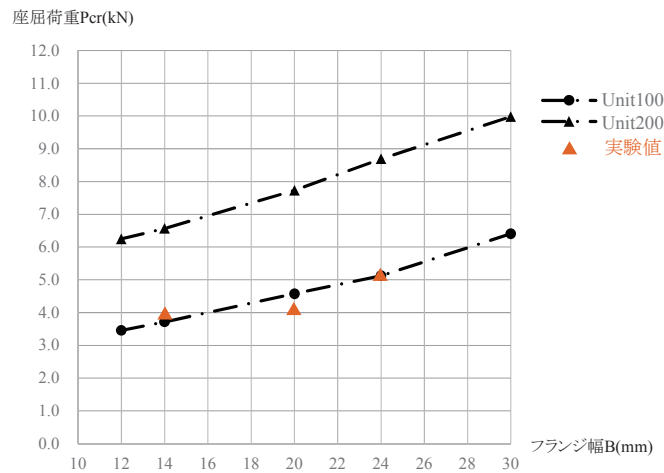


図 82: フランジ幅 B と座屈荷重 Pcr の関係

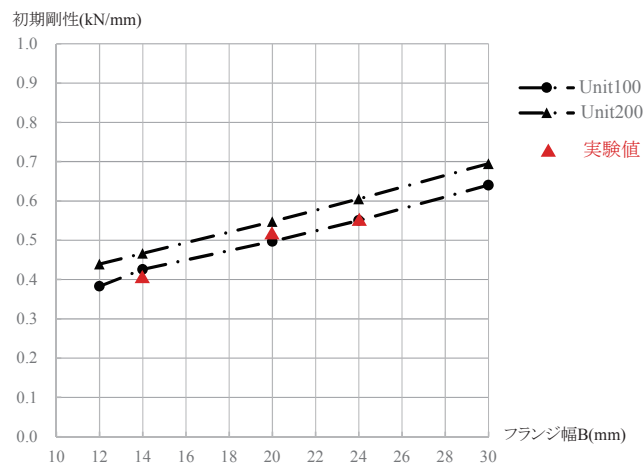


図 83: フランジ幅 B と初期剛性 K の関係

### 3.6 結語

第 3 章では、まず要素試験体の実験概要と実験結果について、次に第 2 章において緩衝材としての錫とガラス面外変形のフランジによる拘束機構をモデル化した詳細解析モデルを用いて静的解析および座屈解析を行い、解析結果と実験結果とを照らし合わせ分析した。

また分析の結果、要素試験体における実験結果と解析結果でフランジ幅  $B$  と座屈荷重  $P_{cr}$  の関係、およびフランジ幅  $B$  と初期剛性  $K$  の関係は非常に良い対応を示すことを確認した。

本章では以上のような結果を得たことから、次章では凹型試験体の実験および詳細解析モデルを用いた解析を行い実験結果と解析結果について分析を行う。

## 第 4 章 凹型試験体の実験と解析

### 4.1 概説

本章では凹型試験体についての実験と解析について述べる。前章と同様に、まず凹型試験体実験の詳細、つまり試験体の形状、寸法、および計測器の設置位置、載荷方法について示し、実験結果として、面外方向、面内方向の荷重変形曲線および損傷状況を示す。また第 2 章で述べた理論に基づいて凹型試験体をモデル化し静的解析を行う。解析結果として得られた変位量から初期剛性を算出する。

## 4.2 凹型試験体実験

### 4.2.1 実験概要

凹型試験体実験は表8に示すように試験体のH型鋼製骨組のフランジ幅をパラメータとし図84,85に示すような凹型試験体(B=12mm、16mm、20mm、24mmの4種9体)について水平載荷試験が行われている。使用鋼材種は要素試験体と同じくSS400である。なお載荷方法は漸増としガラスが破損し耐力がなくなったとみなしたところで載荷終了、ただし試験体301,302のみは載荷方法を一定振幅とし、ガラスが破損し耐力がなくなったとみなしたところで載荷終了としている。

試験体の寸法は芯寸法で[幅×高さ]が[1125mm×1500mm]、要素試験体実験と同様にガラスは厚さ $t=7.9\text{mm}$ のフロート板ガラスを用い、ガラスとH型鋼製骨組の間には厚さ $t=1\text{mm}$ の錫板を挿入している。

測定器設置位置、試験機へのセットアップの様子を図86,87に示す。なお面内方向の水平変位は試験体頂部に取り付けた変位計1,2の平均と脚部に設置した変位計3,4の平均の差から算出し用いるものとした。

初期剛性の読み取りは要素試験体の実験と同様に行い、得られた荷重変形曲線においてスリップ終了後の弾性域であると考えられる5kN時の接線剛性から読み取っている。

表8: 凹型試験体諸元

| 試験体名                   | フランジ幅 B(mm)<br>(H-15xBx4.5x3) |
|------------------------|-------------------------------|
| 試験体 201 <sup>20)</sup> | 12                            |
| ○ 試験体 202              | 12                            |
| ○ 試験体 203              | 12                            |
| 試験体 204 <sup>22)</sup> | 16                            |
| 試験体 205 <sup>20)</sup> | 20                            |
| ○ 試験体 206              | 20                            |
| 試験体 207 <sup>23)</sup> | 24                            |
| 試験体 301 <sup>23)</sup> | 12                            |
| 試験体 302 <sup>23)</sup> | 12                            |

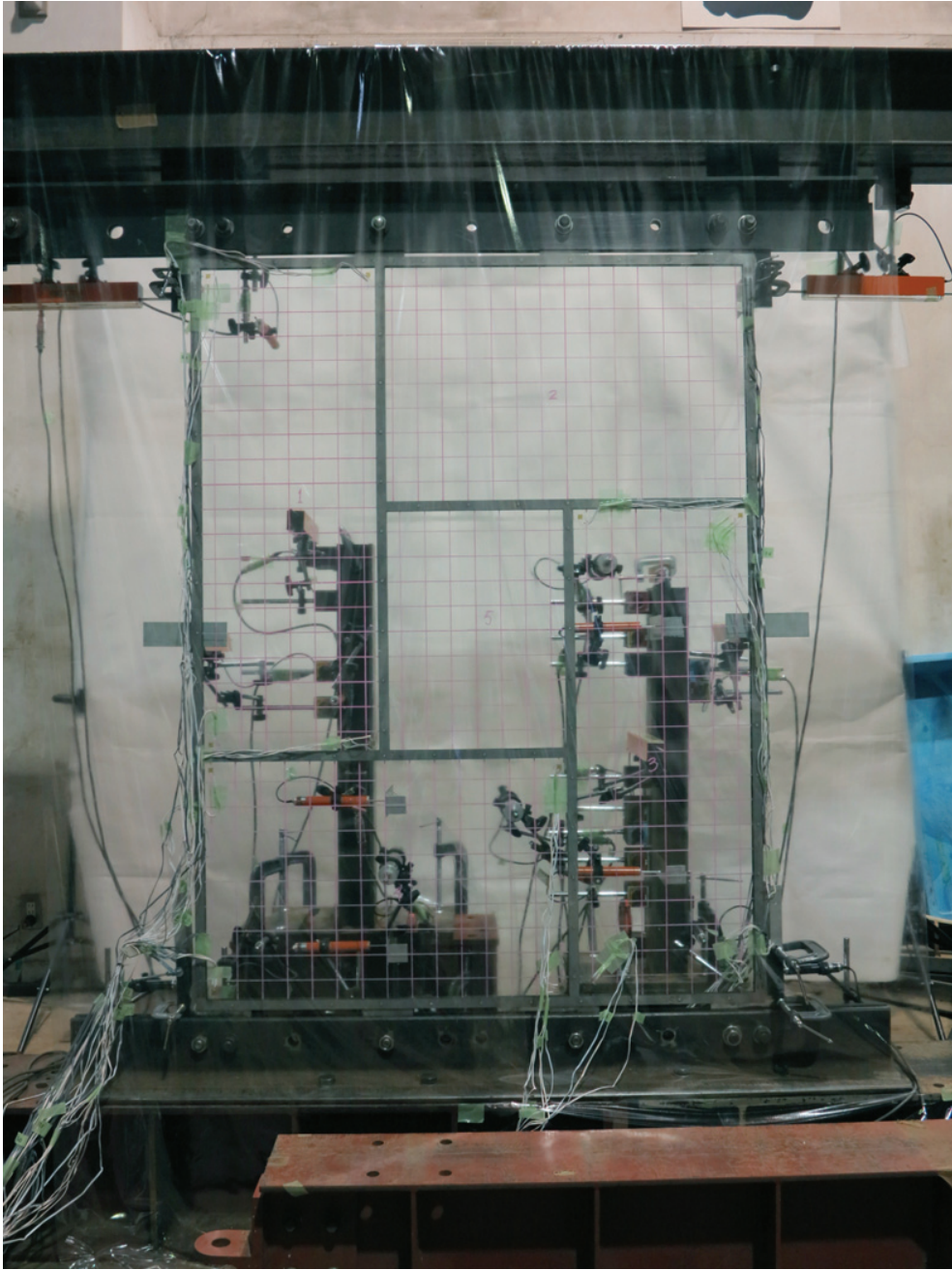


図 84: 凹型試験体



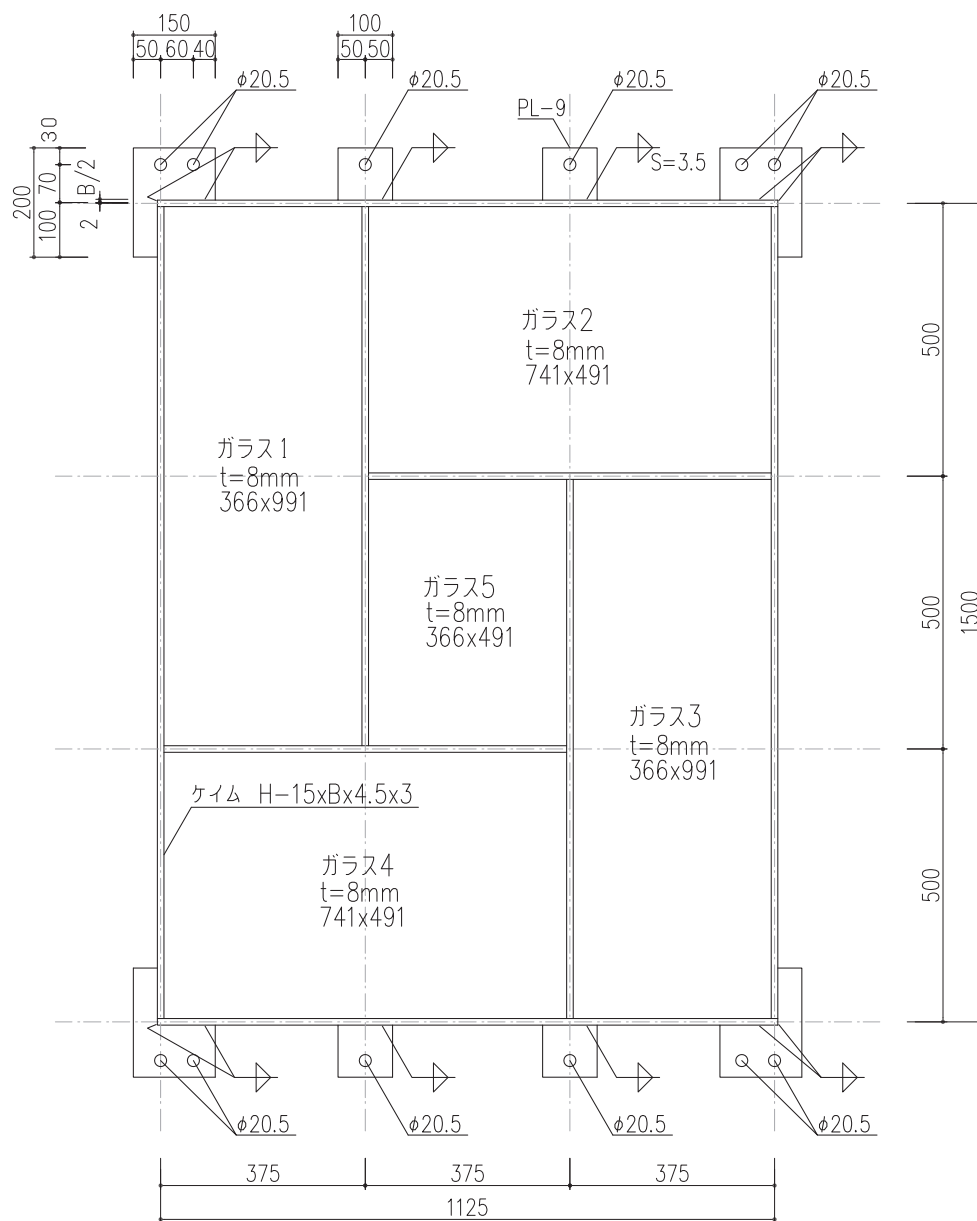


図 85: 凹型試験体の形状および寸法

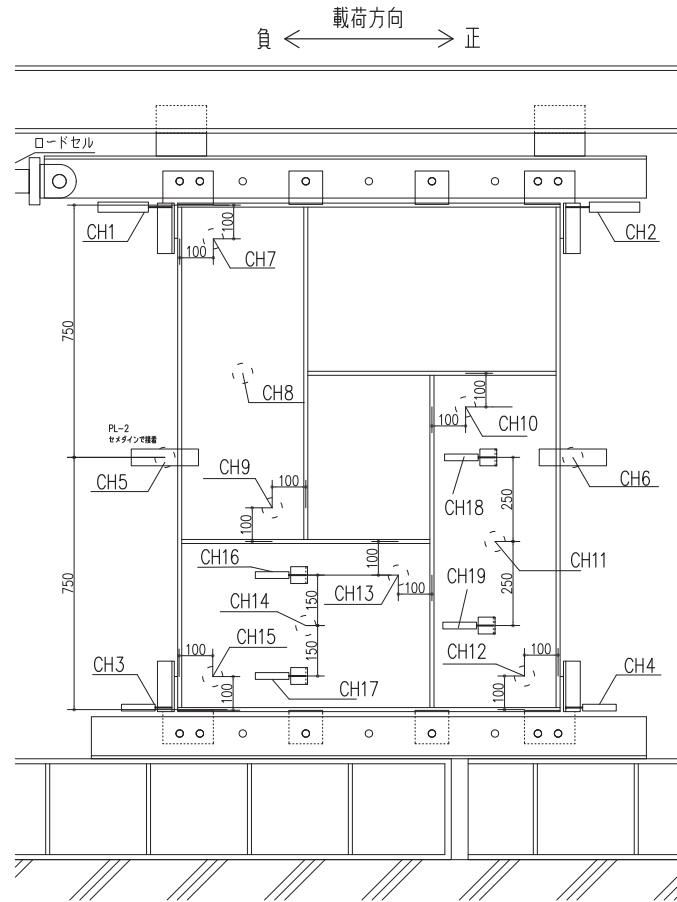


図 86: 変位計設置位置

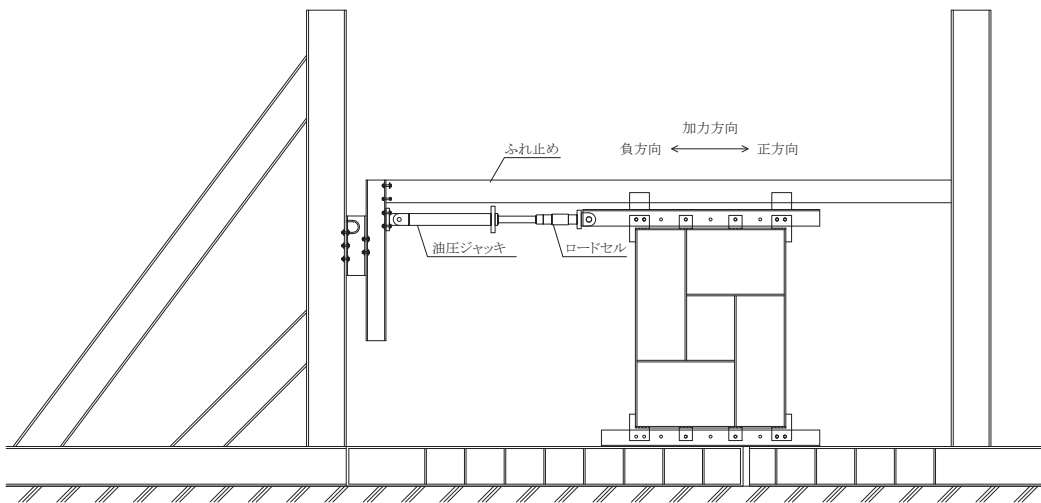


図 87: 丕型試験体セットアップ図

4.2.2 実験結果

本論文の執筆にあたり、筆者が新たに行った実験である試験体 202,203,206 を代表として、実験結果を以下に示す。なお以下に示す荷重変形曲線は縦軸を図 87 におけるロードセルが測定した値、すなわち試験体上部に入力される荷重 (kN) としている。

■ 試験体 202(B=12mm) の実験結果

試験体 202 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 89 から、15mm 程度スリップし、初期剛性は概ね 0.75kN/mm 程度で荷重は上昇したことがわかる。なお、3 サイクル目正方向載荷時に変形がスリップを含め 38mm、最大耐力 11kN 付近に達したところで図 91,90 のようにガラスが破損したため載荷終了とした。

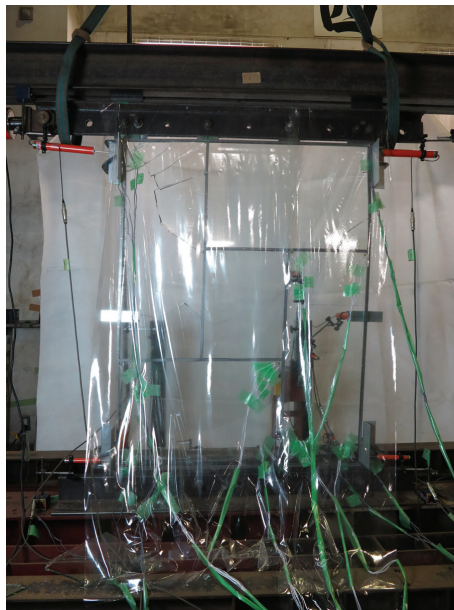


図 88: 試験体 202 損傷時写真

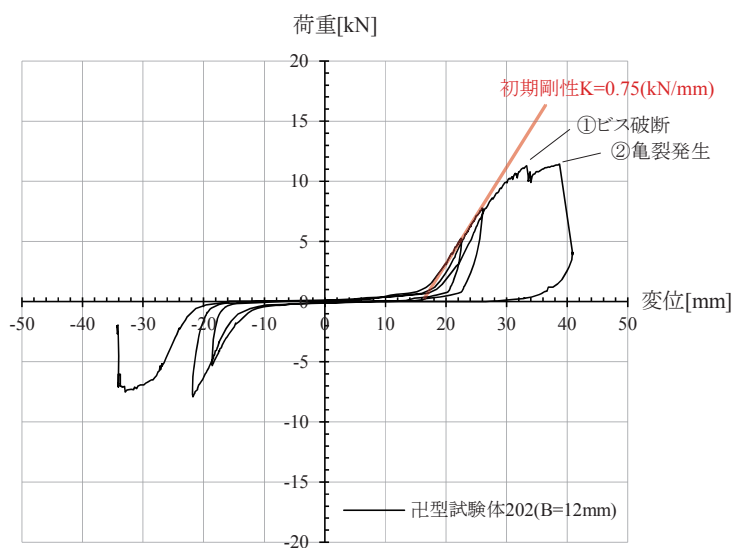


図 89: 試験体 202 荷重変形曲線

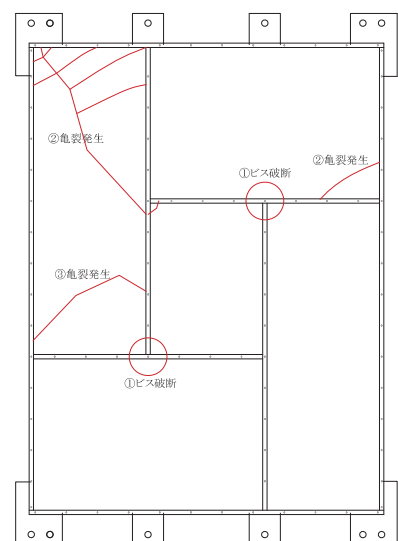


図 90: 試験体 203 損傷状況図

■ 試験体 203(B=12mm) の実験結果

試験体 203 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 92 から、10mm 程度スリップし、初期剛性は概ね 0.74kN/mm 程度で荷重は上昇したことがわかる。また、3 サイクル目負方向載荷時に変形がスリップを含め-38mm、最大耐力-9kN 付近に達したところで図 91,93 のようにガラスが破損したため載荷終了とした。

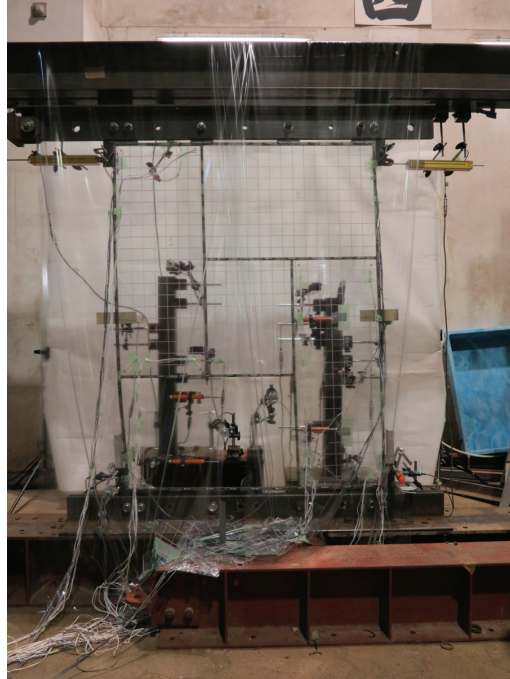


図 91: 試験体 203 損傷時写真

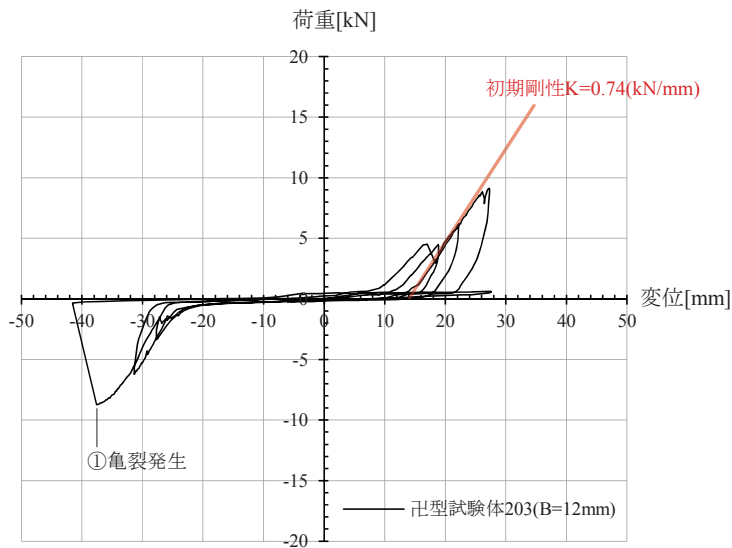


図 92: 試験体 203 荷重変形曲線

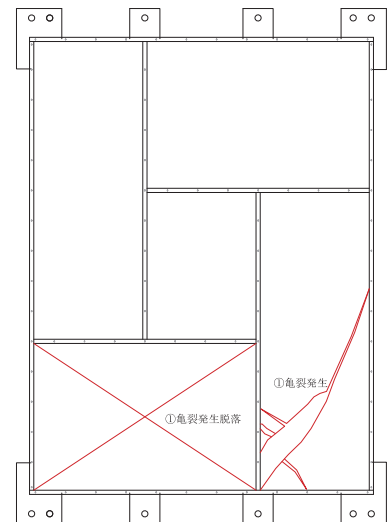


図 93: 試験体 203 損傷状況図

■ 試験体 206(B=20mm) の実験結果

試験体 206 の実験結果について、まず面内の荷重変形曲線の図 95 から、15mm 程度スリップし、初期剛性は概ね 0.85kN/mm 程度で荷重は上昇したことがわかる。また、3 サイクル目負方向載荷時に変形がスリップを含め 35mm、最大耐力-13kN 付近に達したところで図 94,96 のようにガラスが破損したため載荷終了とした。

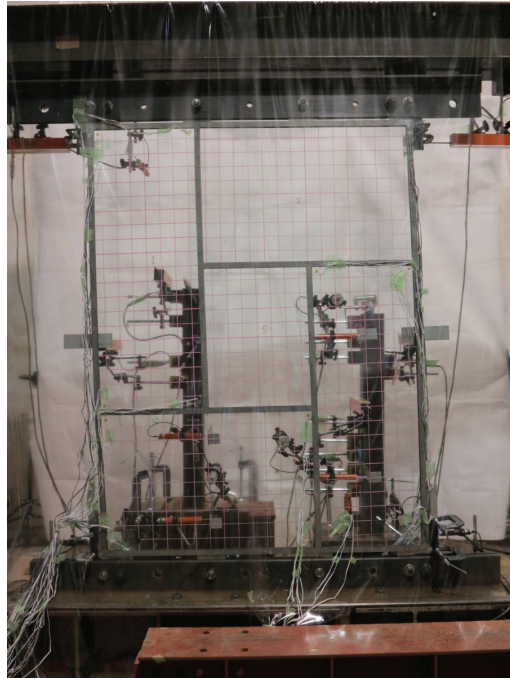


図 94: 試験体 206 損傷時写真

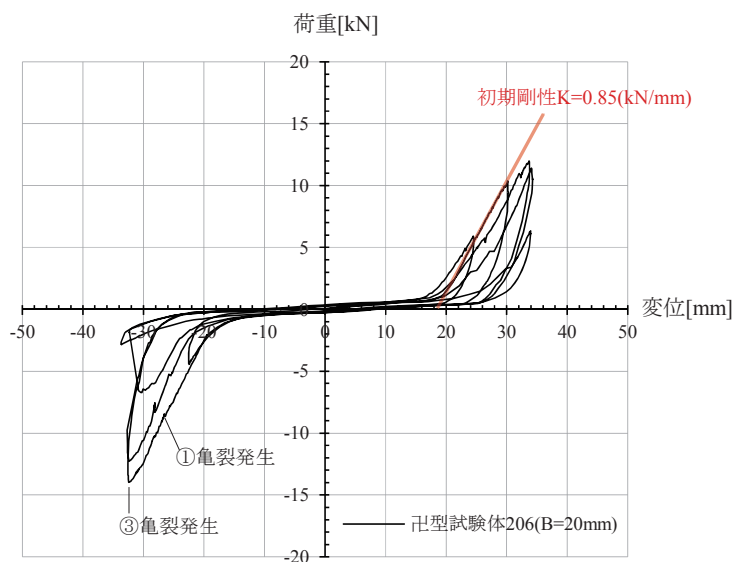


図 95: 試験体 206 荷重変形曲線

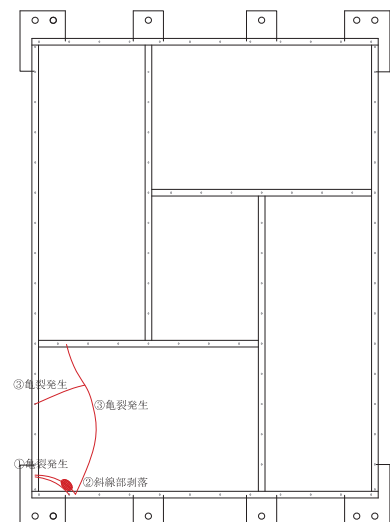


図 96: 試験体 206 損傷状況図

### 4.3 凹型試験体モデルの静的解析

#### 4.3.1 解析概要

解析は要素試験体の解析と同様に佐藤により作成された解析プログラム HOGAN<sup>24)</sup> を用いて行うものとする。

試験体 201(12mm)~207(24mm) に対応してフランジ幅  $B=12, 16, 20, 24\text{mm}$  の4種類-を中心に、図 97 のような解析モデルを作成し、5種類のフランジ幅  $B=12, 16, 20, 24, 30\text{mm}$  の解析モデルについて解析を行う。

なお、ガラスのプロポーションによってグリッドの割付が異なるのは、ガラスをブレースのモデルに置換する際に、正方形のグリッドで等価なせん断剛性をとるモデル化を行ったためである。したがって、図 97 における、右上と左下のガラス (375x1000) は 90mm 間隔のグリッドで割付けたが、左上と右下のガラス (750x500)、および中央のガラス (375x500) は 70mm 間隔のグリッドで割付けている。本モデルより、グリッドを細かく分割し割り付けることも可能であるが、細分化しても精度は同等であることから、本モデル化程度のグリッド間隔で妥当と判断した。

解析は実験と同様に载荷点を上部2点(節点 209、264)とし、それぞれに 0.5tf ずつ計  $Q=1\text{tf}$  载荷とし、静的解析を行う。以下表 9 に入力した部材の諸元を示す。

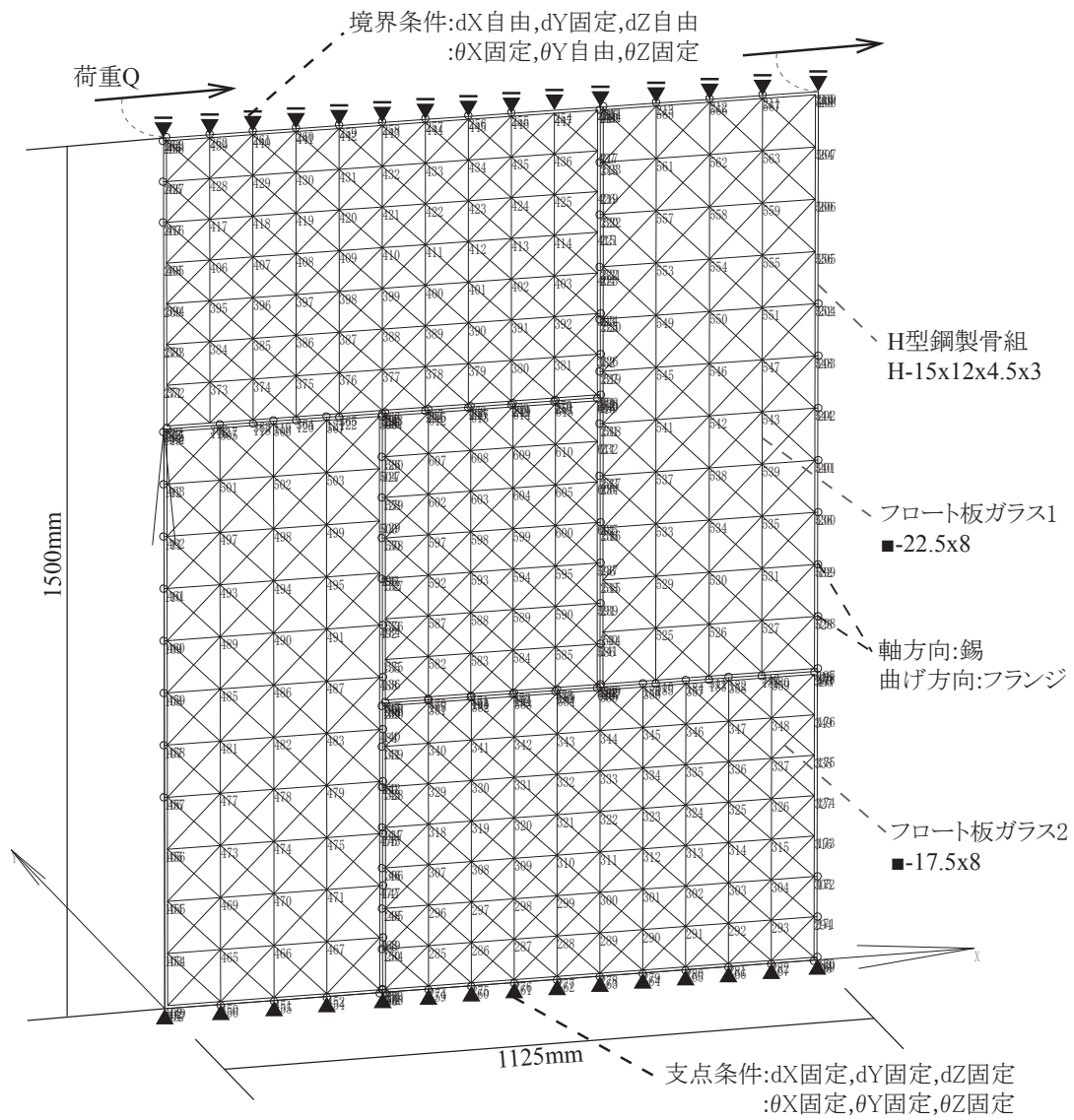


図 97: 解析モデル例 (フランジ幅 12mm の場合のモデル)

表 9: 詳細解析モデル Multi100 の諸元

| 解析モデル名         | 材質                             | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                |                                |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Multi101       | H 型鋼製骨組<br>H-15x12x4.5x3       | 20,5000                    | A(mm <sup>2</sup> )   | 112.50                      |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 932.34                      |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 2919.38                     |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 489.38                      |
|                | フロート板ガラス<br>1:■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|                | フロート板ガラス<br>2:■-17.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 140.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 3572.91                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 746.67                      |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 2986.67                     |
|                | 錫フランジ部材<br>1:BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                | 錫フランジ部材<br>2:BxD-8x70<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 560.0 x 5<br>(端部) 280.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
| フランジ部材<br>(剛体) | -                              | A(mm <sup>2</sup> )        | 0                     |                             |
|                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                     |                             |
|                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |
|                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |



| 解析モデル名         | 材質                             | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                |                                |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Multi102       | H型鋼製骨組<br>H-15x16x4.5x3        | 20,500                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 136.50                      |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 2116.34                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 3801.38                     |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 561.38                      |
|                | フロート板ガラス<br>1:■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|                | フロート板ガラス<br>2:■-17.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 140.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 3572.91                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 746.67                      |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 2986.67                     |
|                | 錫フランジ部材<br>1:BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                | 錫フランジ部材<br>2:BxD-8x70<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 560.0 x 5<br>(端部) 280.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
| フランジ部材<br>(剛体) | -                              | A(mm <sup>2</sup> )        | 0                     |                             |
|                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                     |                             |
|                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |
|                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |

| 解析モデル名         | 材質                             | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                |                                |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Multi103       | H型鋼製骨組<br>H-15x20x4.5x3        | 20,500                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 160.50                      |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 4068.34                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 4683.38                     |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 633.38                      |
|                | フロート板ガラス<br>1:■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|                | フロート板ガラス<br>2:■-17.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 140.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 3572.91                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 746.67                      |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 2986.67                     |
|                | 錫フランジ部材<br>1:BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                | 錫フランジ部材<br>2:BxD-8x70<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 560.0 x 5<br>(端部) 280.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
| フランジ部材<br>(剛体) | -                              | A(mm <sup>2</sup> )        | 0                     |                             |
|                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                     |                             |
|                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |
|                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |

| 解析モデル名                         | 材質                             | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                        |                             |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                |                                |                            | A(mm <sup>2</sup> )         |                             |
| Multi104                       | H型鋼製骨組<br>H-15x24x4.5x3        | 20,500                     | A(mm <sup>2</sup> )         | 184.50                      |
|                                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> )       | 6980.34                     |
|                                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> )       | 5565.38                     |
|                                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> )       | 705.38                      |
|                                | フロート板ガラス<br>1:■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )         | 180.0                       |
|                                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> )       | 7593.75                     |
|                                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> )       | 960.0                       |
|                                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> )       | 3840.0                      |
|                                | フロート板ガラス<br>2:■-17.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )         | 140.0                       |
|                                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> )       | 3572.91                     |
|                                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> )       | 746.67                      |
|                                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> )       | 2986.67                     |
|                                | 錫フランジ部材<br>1:BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )         | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|                                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> )       | 0                           |
|                                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> )       | ∞                           |
|                                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> )       | ∞                           |
| 錫フランジ部材<br>2:BxD-8x70<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)                | A(mm <sup>2</sup> )        | 560.0 x 5<br>(端部) 280.0 x 5 |                             |
|                                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                           |                             |
|                                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                           |                             |
|                                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                           |                             |
| フランジ部材<br>(剛体)                 | -                              | A(mm <sup>2</sup> )        | 0                           |                             |
|                                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                           |                             |
|                                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                           |                             |
|                                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                           |                             |

| 解析モデル名         | 材質                             | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 断面係数                  |                             |
|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
|                |                                |                            | A(mm <sup>2</sup> )   |                             |
| Multi105       | H型鋼製骨組<br>H-15x30x4.5x3        | 20,500                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 220.50                      |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 13568.34                    |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 6888.38                     |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 813.38                      |
|                | フロート板ガラス<br>1:■-22.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 180.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 7593.75                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 960.0                       |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 3840.0                      |
|                | フロート板ガラス<br>2:■-17.5x8<br>t=8  | 71,000                     | A(mm <sup>2</sup> )   | 140.0                       |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 3572.91                     |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | 746.67                      |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | 2986.67                     |
|                | 錫フランジ部材<br>1:BxD-8x90<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 720.0 x 5<br>(端部) 360.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                | 錫フランジ部材<br>2:BxD-8x70<br>t=1mm | 5<br>(一部 26.74)            | A(mm <sup>2</sup> )   | 560.0 x 5<br>(端部) 280.0 x 5 |
|                |                                |                            | Ixx(mm <sup>4</sup> ) | 0                           |
|                |                                |                            | Iyy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
|                |                                |                            | Jxy(mm <sup>4</sup> ) | ∞                           |
| フランジ部材<br>(剛体) | -                              | A(mm <sup>2</sup> )        | 0                     |                             |
|                |                                | Ixx(mm <sup>4</sup> )      | 0                     |                             |
|                |                                | Iyy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |
|                |                                | Jxy(mm <sup>4</sup> )      | ∞                     |                             |

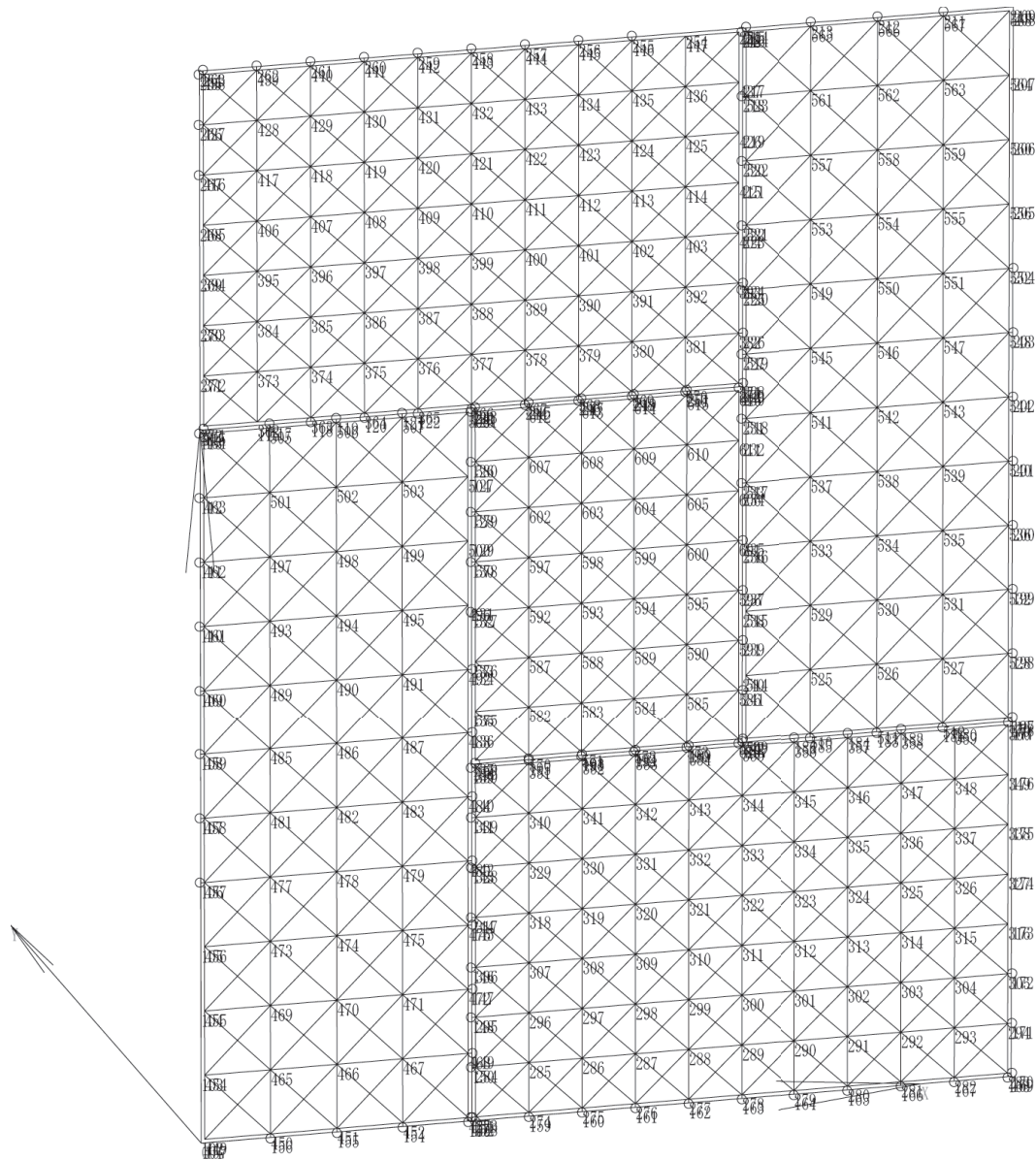
4.3.2 解析結果

作成した凹型試験体の詳細モデルについて静的解析を行った結果を以下に示す。

ただし、変形図は変形を5倍で表示している。また軸力図、せん断力図中の数値は tf を、曲げモーメント図は tf·m を表す。

■Multi101 の解析モデルと解析結果

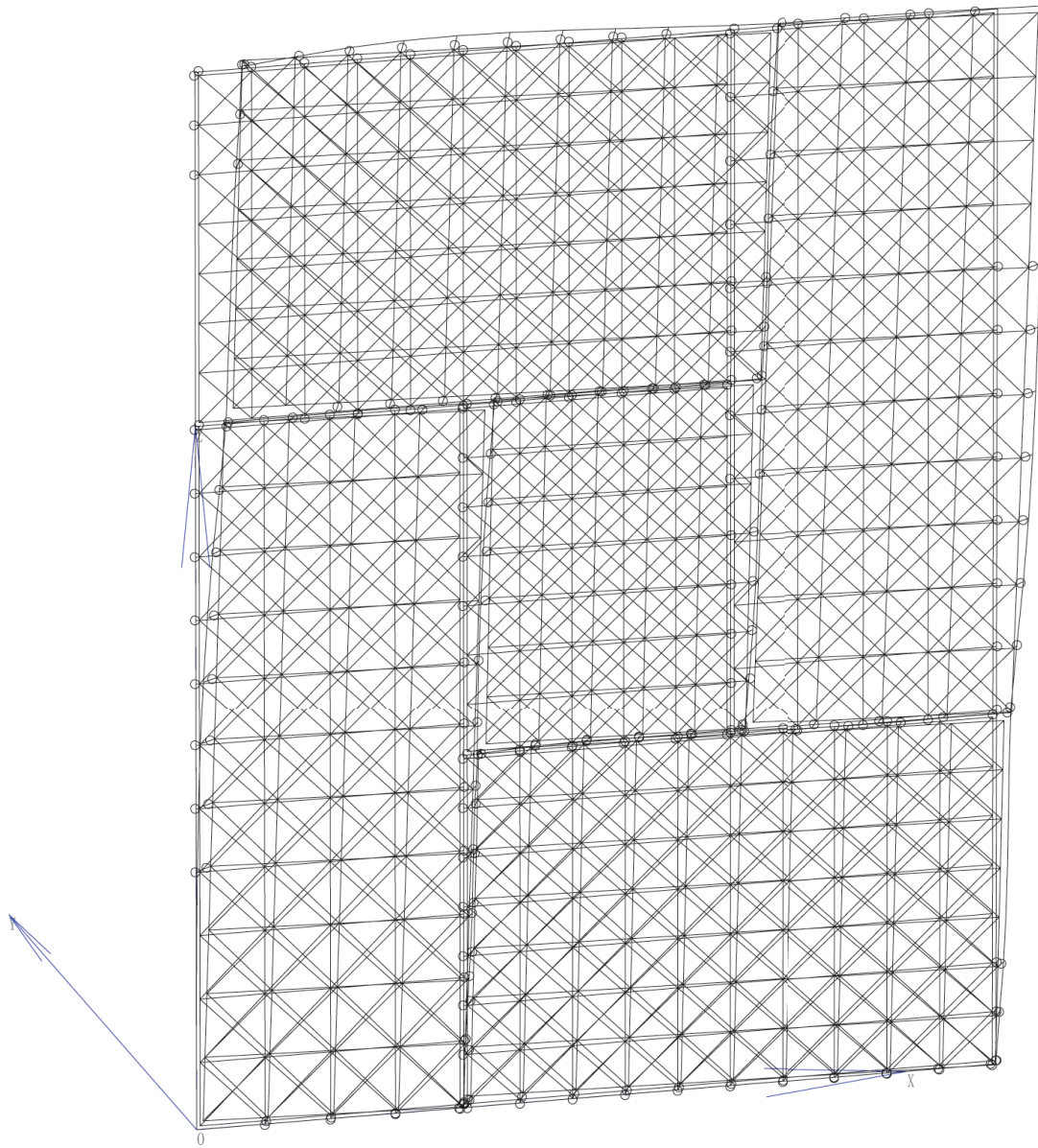
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 98: Multi101 解析モデル図

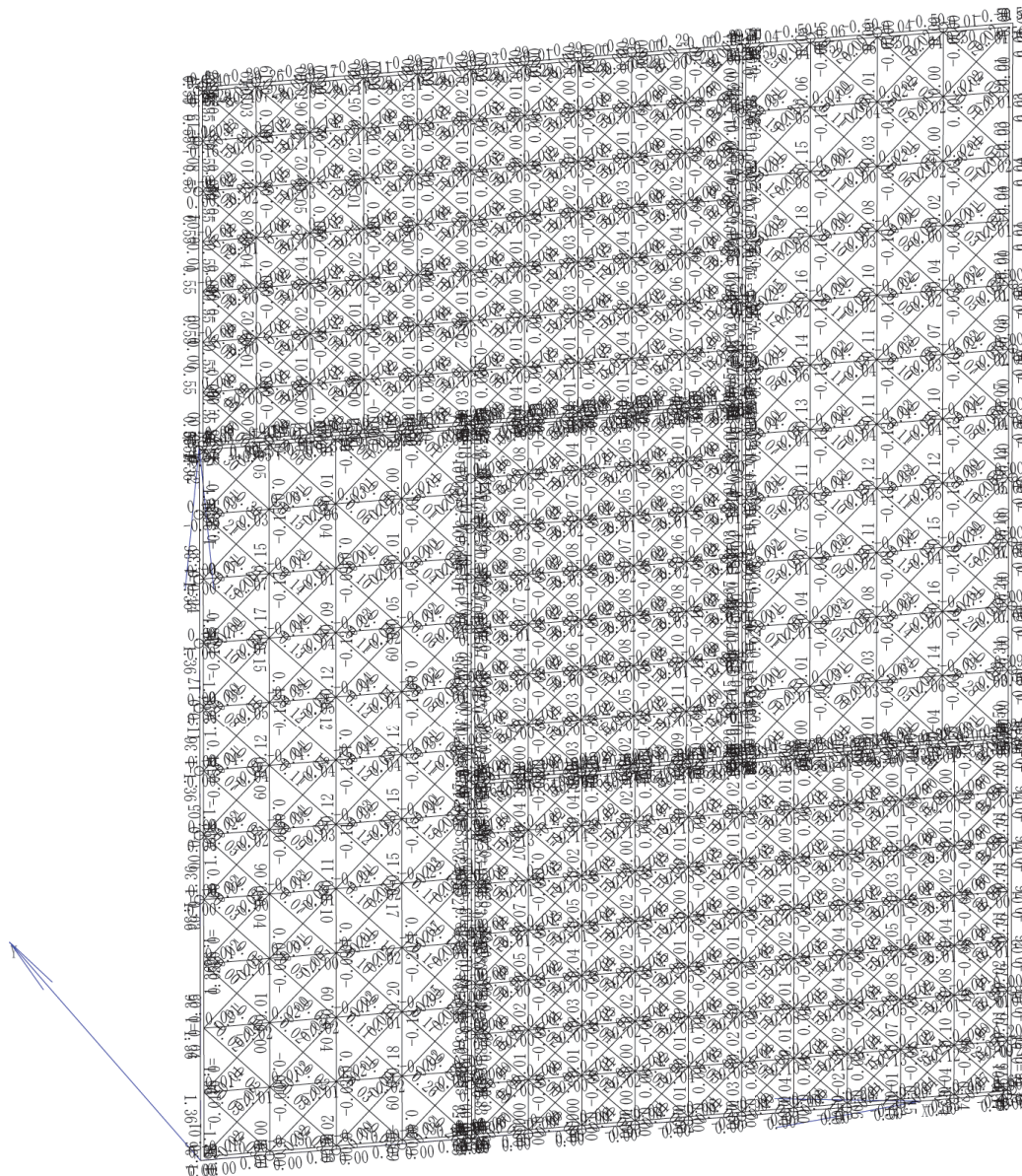
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 99: Multi101 の変形図

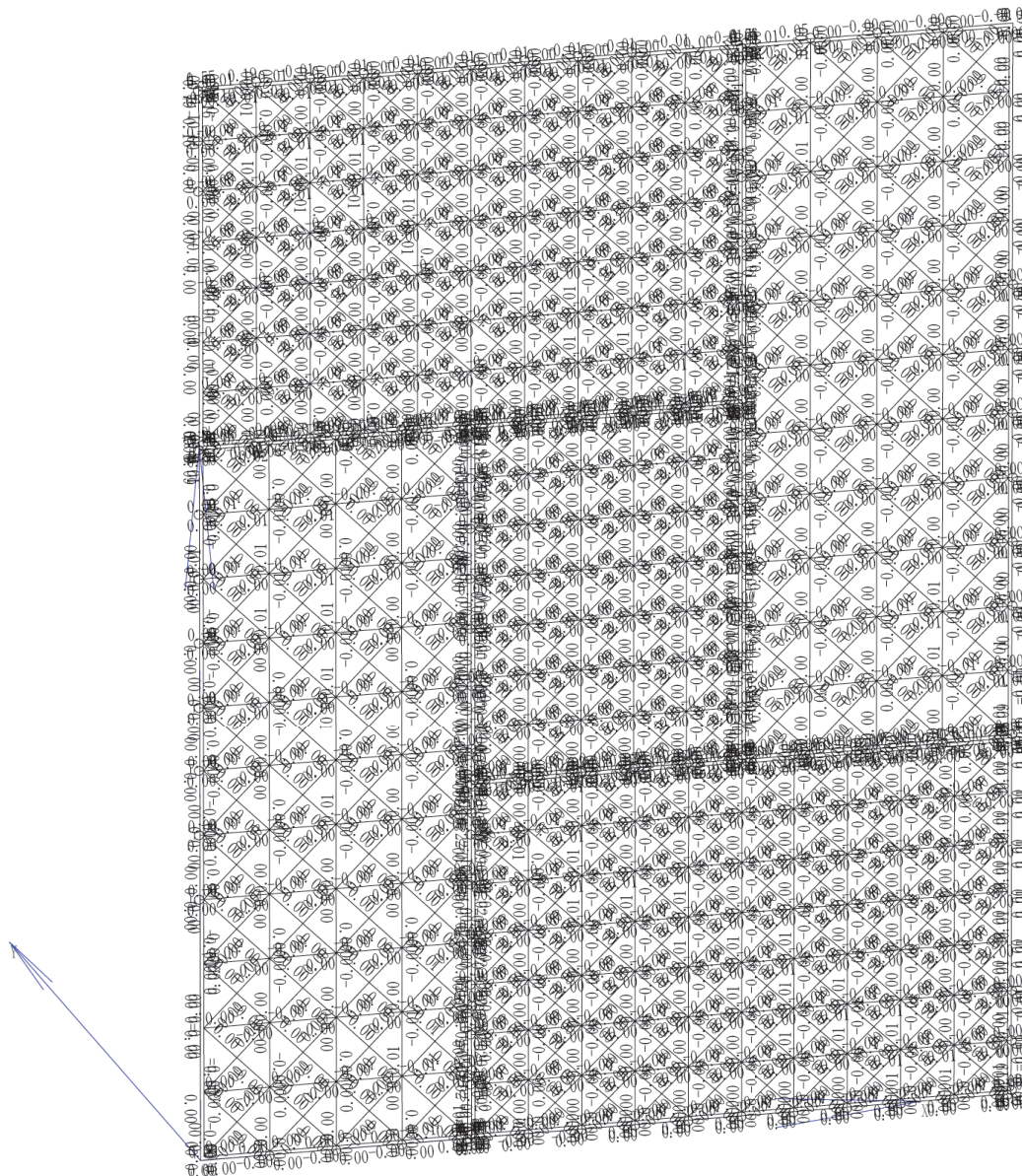
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 100: Multi101 の軸力図

せん断力図

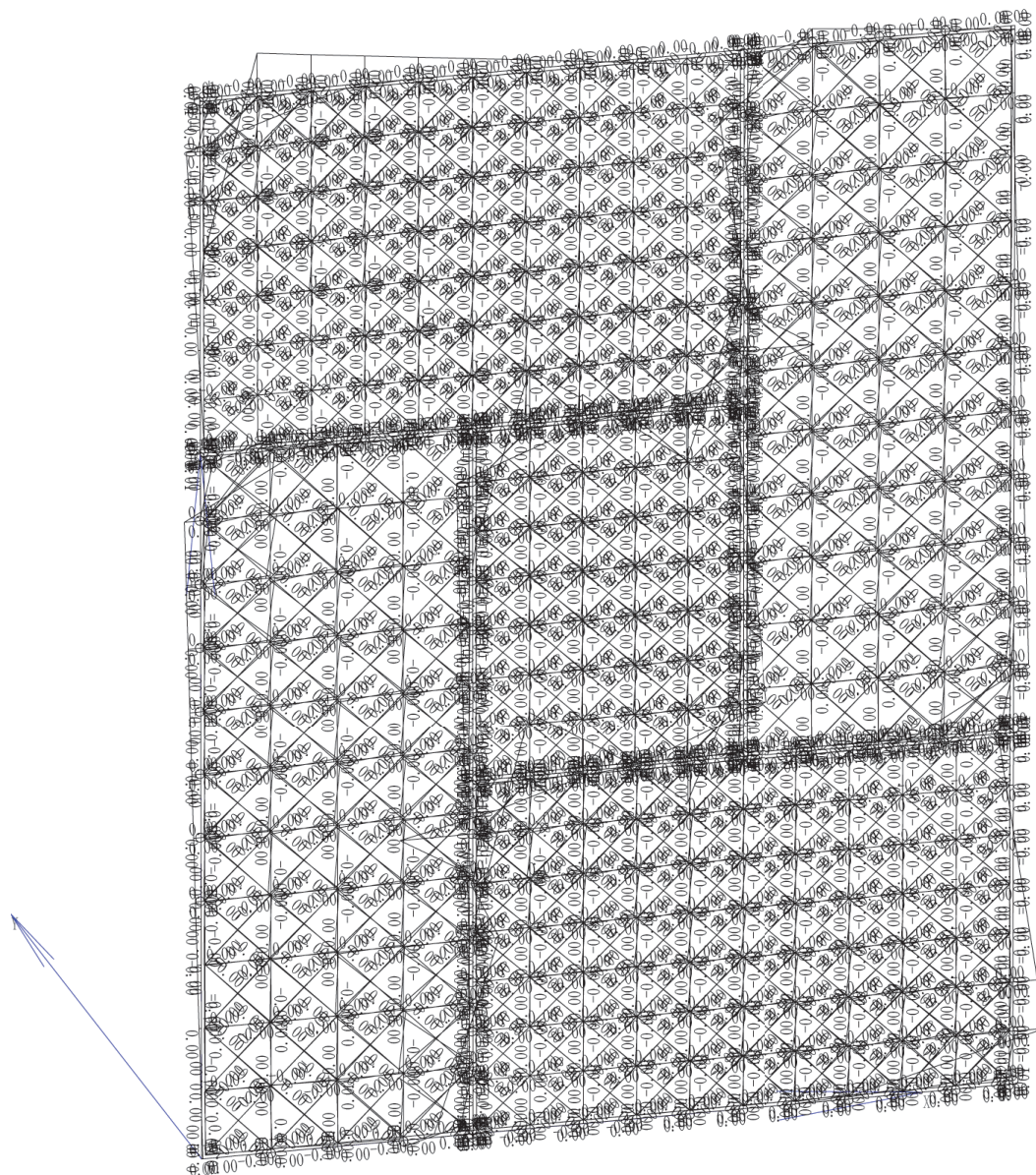


せん断力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 101: Multi101 の Q 図



曲げモーメント図

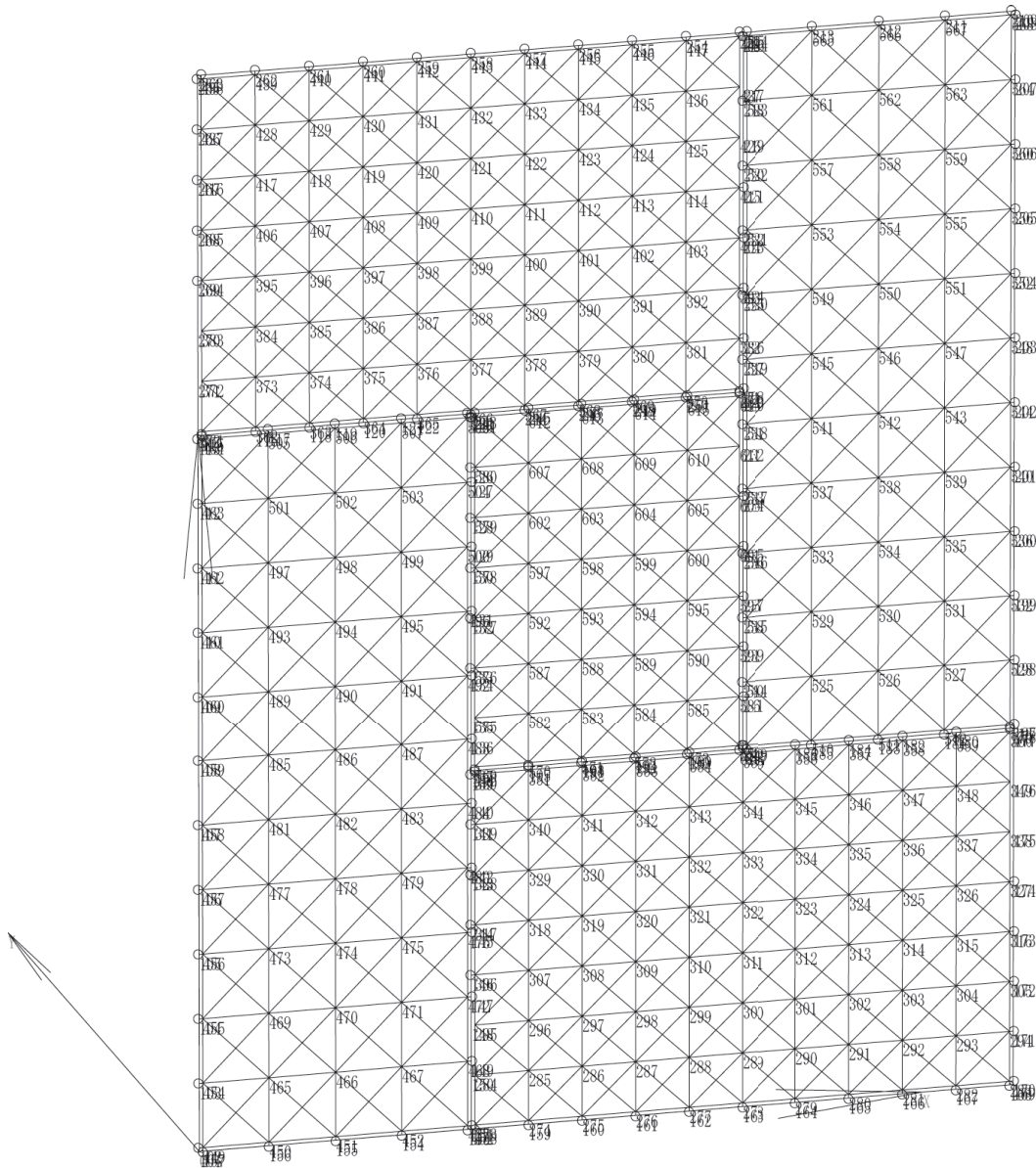


曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 102: Multi101 の M 図

■Multi102 の解析モデルと解析結果

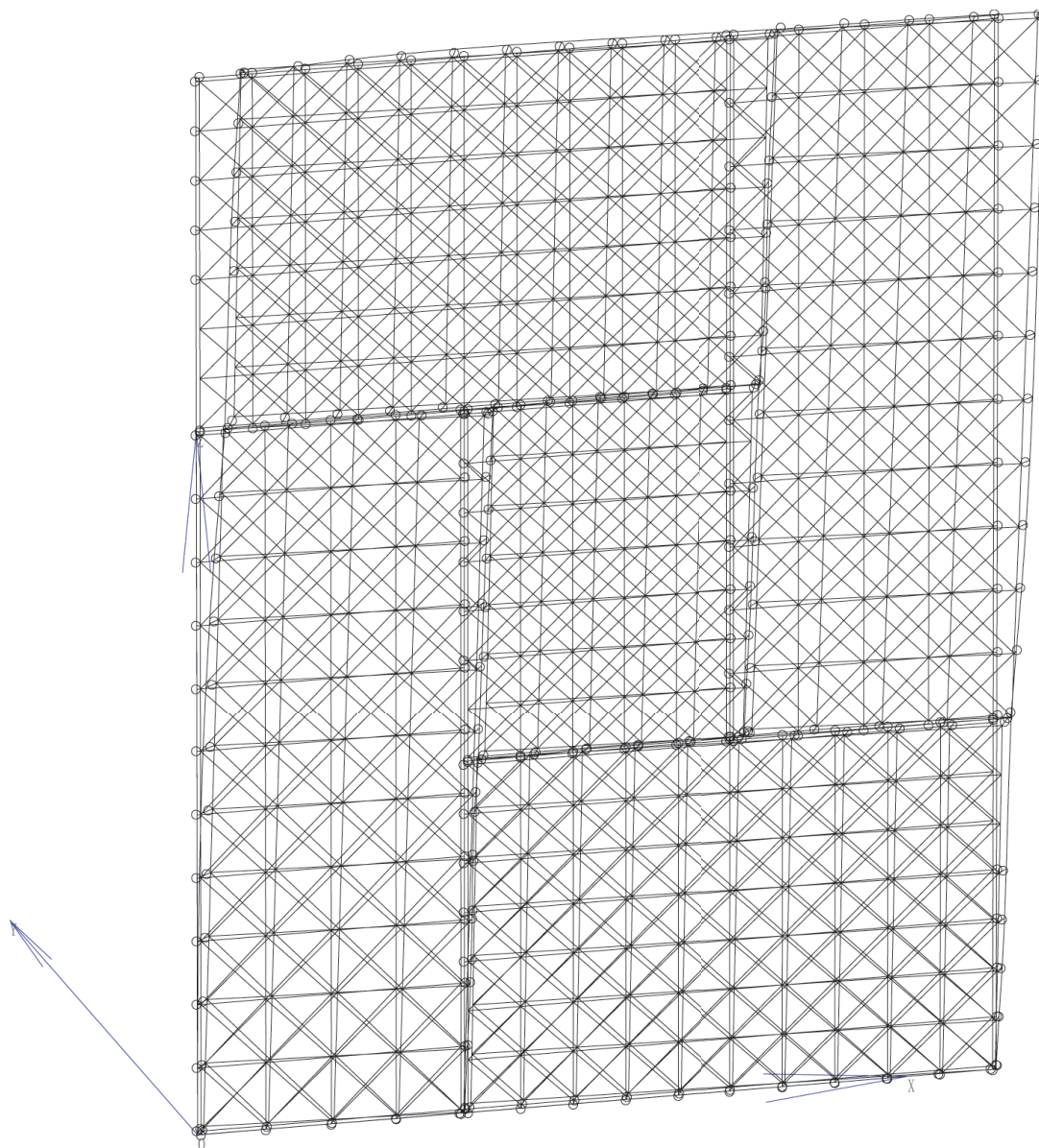
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 103: Multi102 解析モデル図

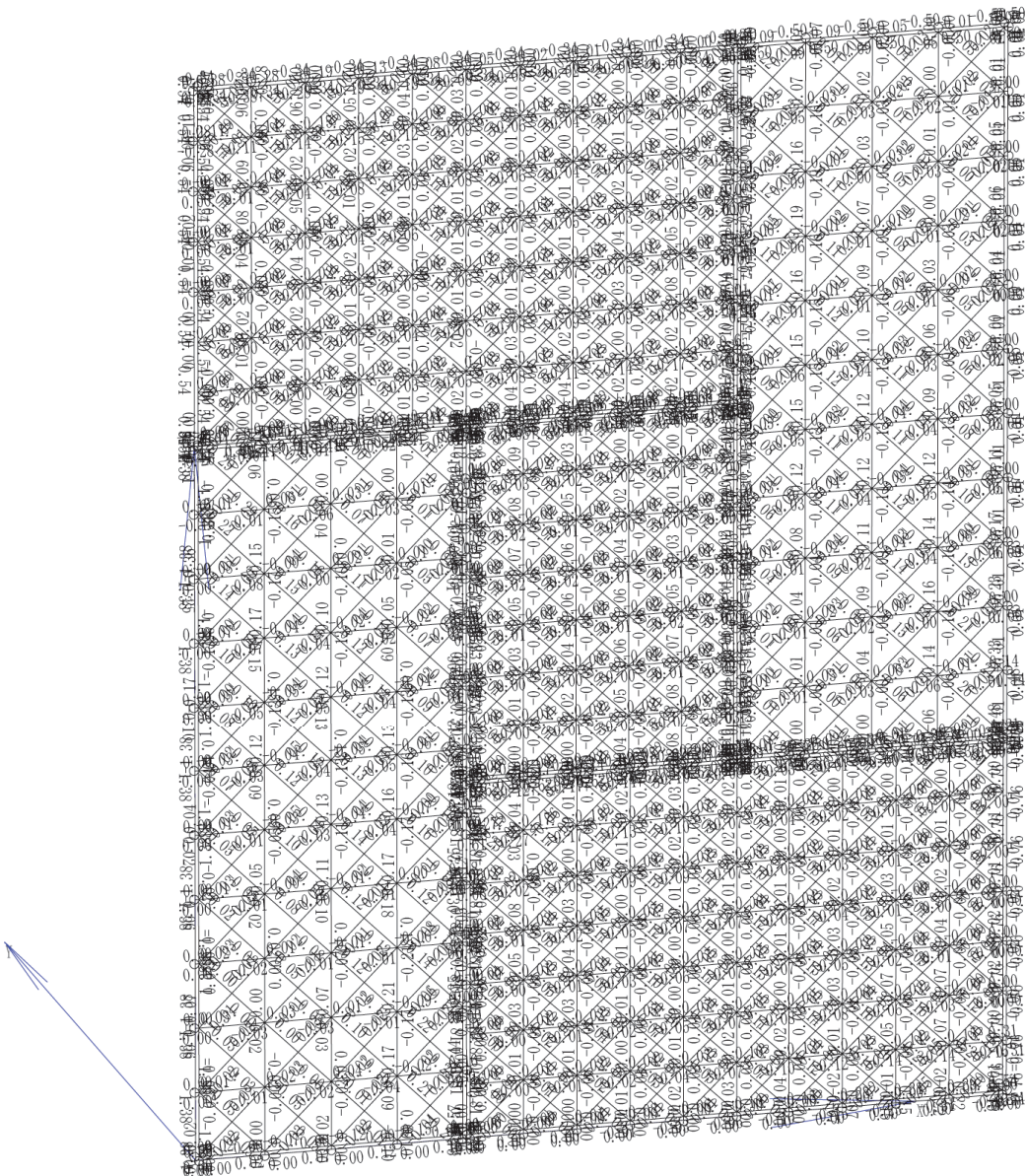
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 104: Multi102 の変形図

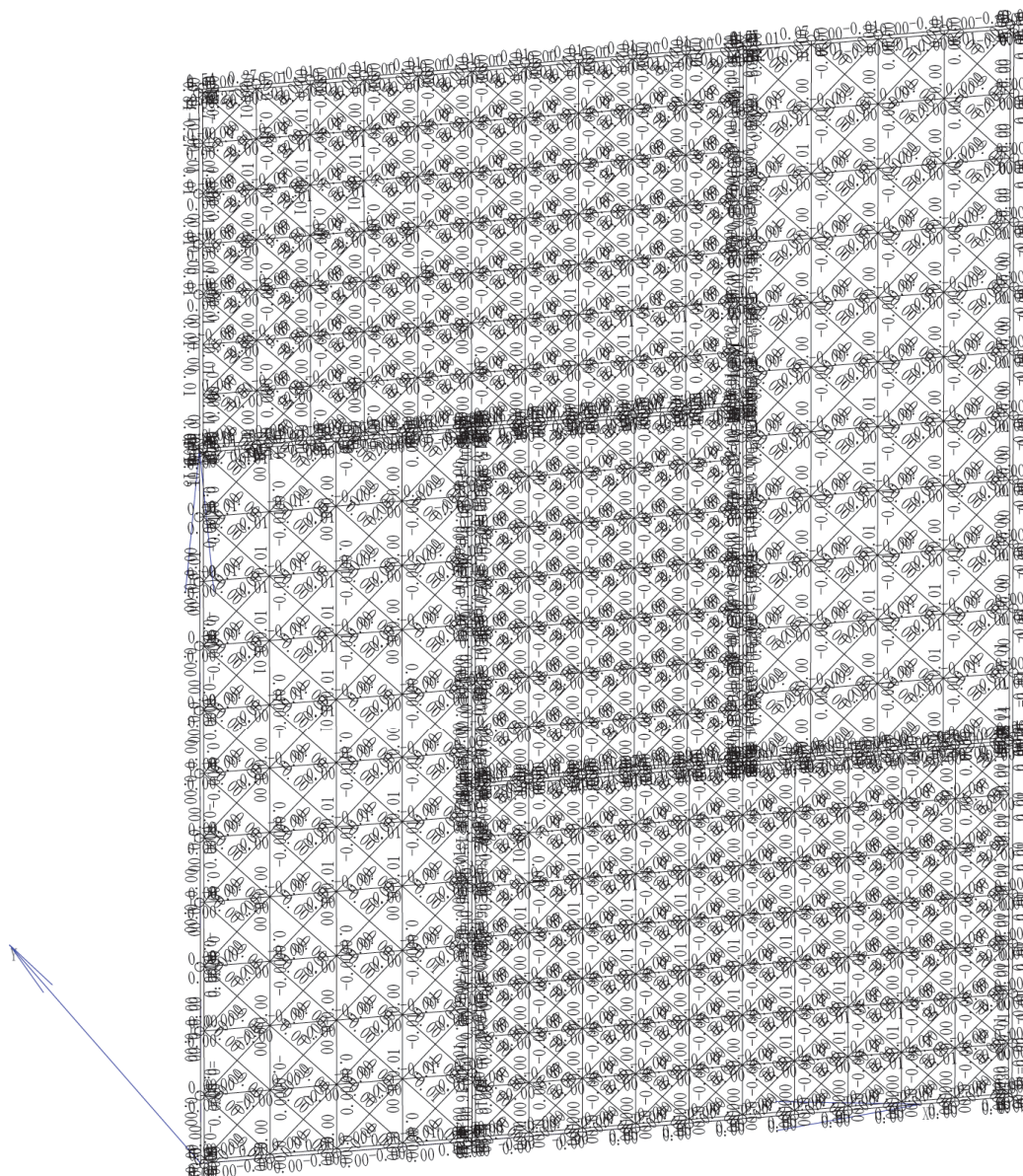
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 105: Multi102 の軸力図

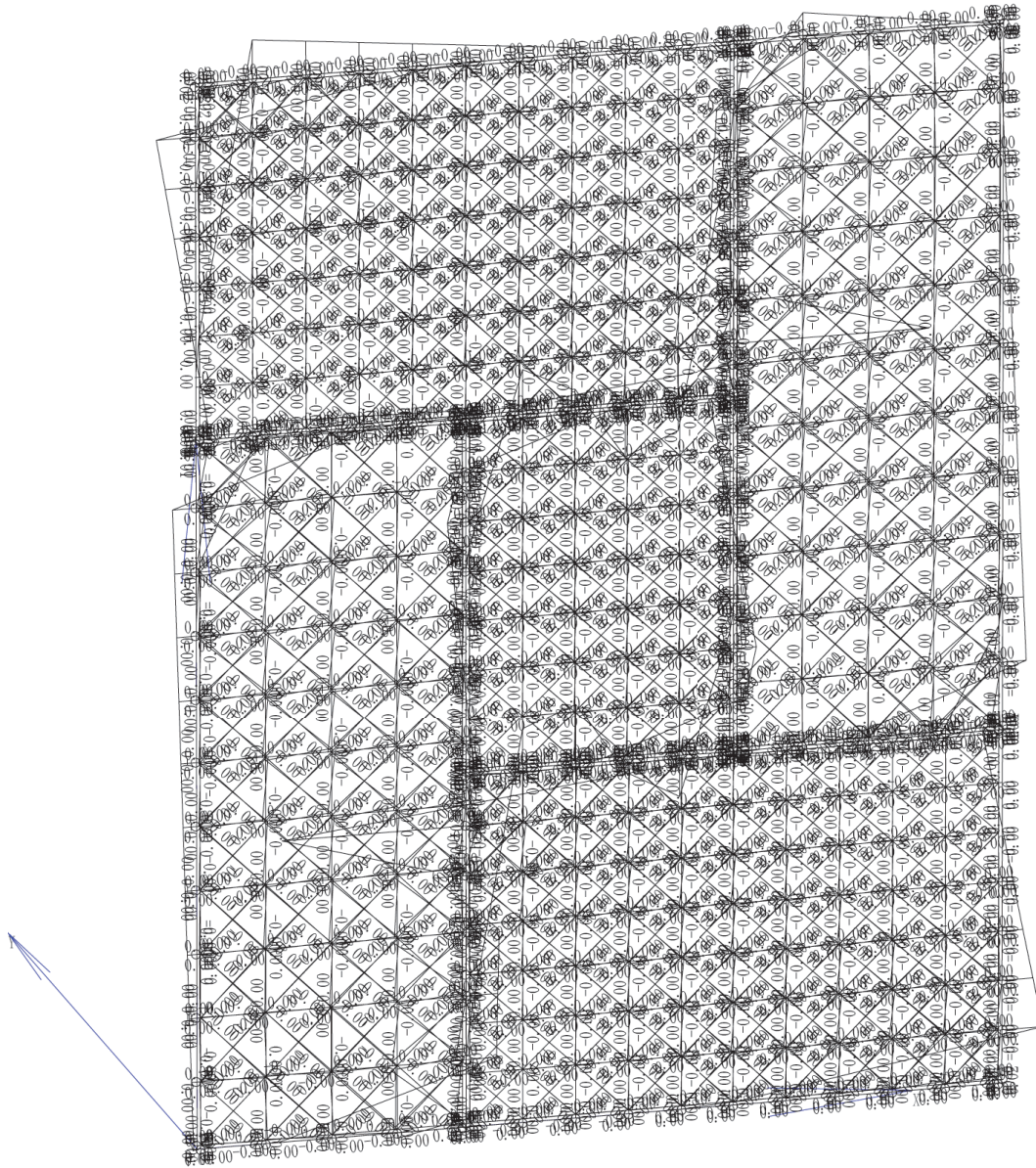
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 106: Multi102 の Q 図

曲げモーメント図

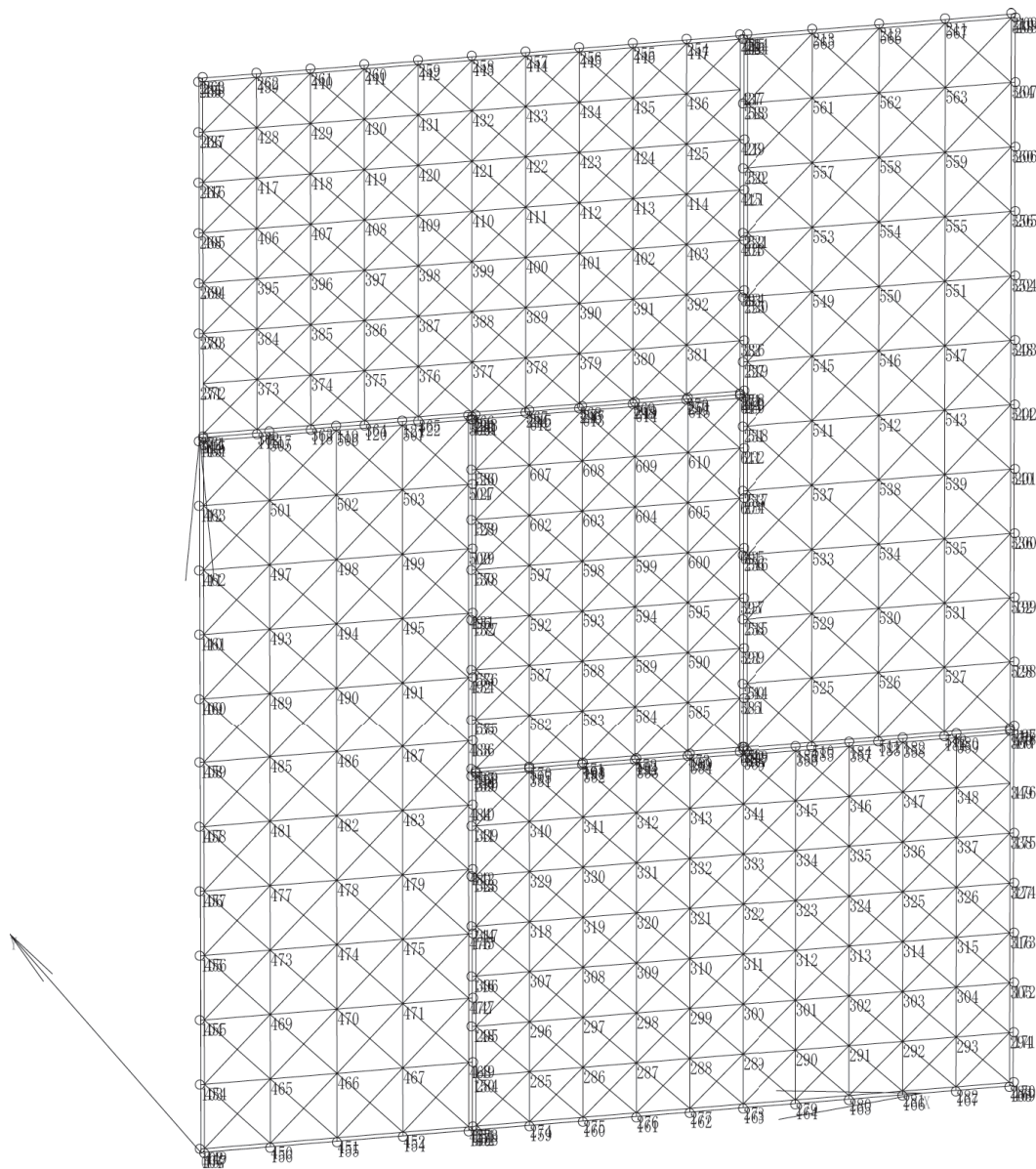


曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱, 梁, プレース, 壁, 床

図 107: Multi102 の M 図

■Multi103の解析モデルと解析結果

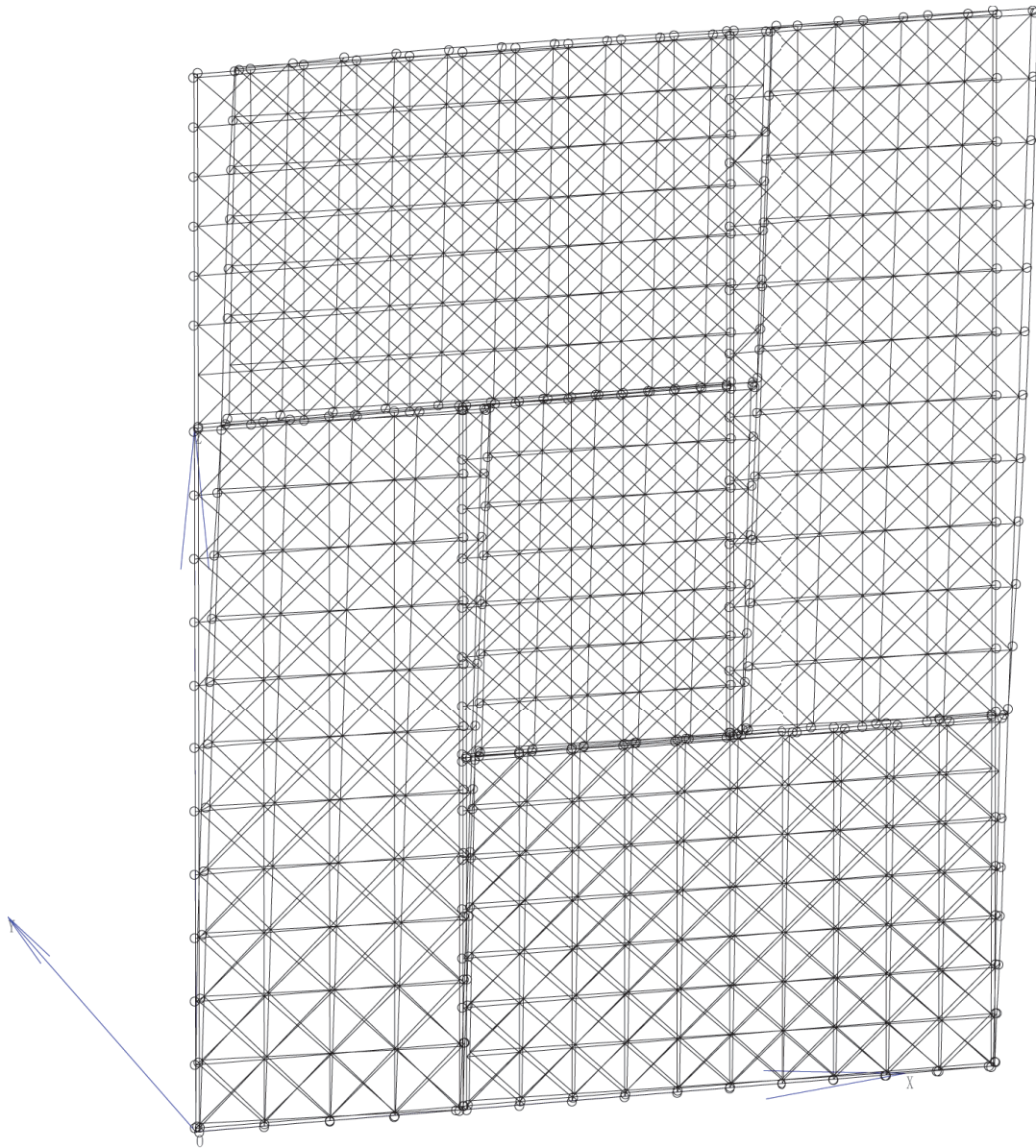
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図108: Multi103 解析モデル図

変形図

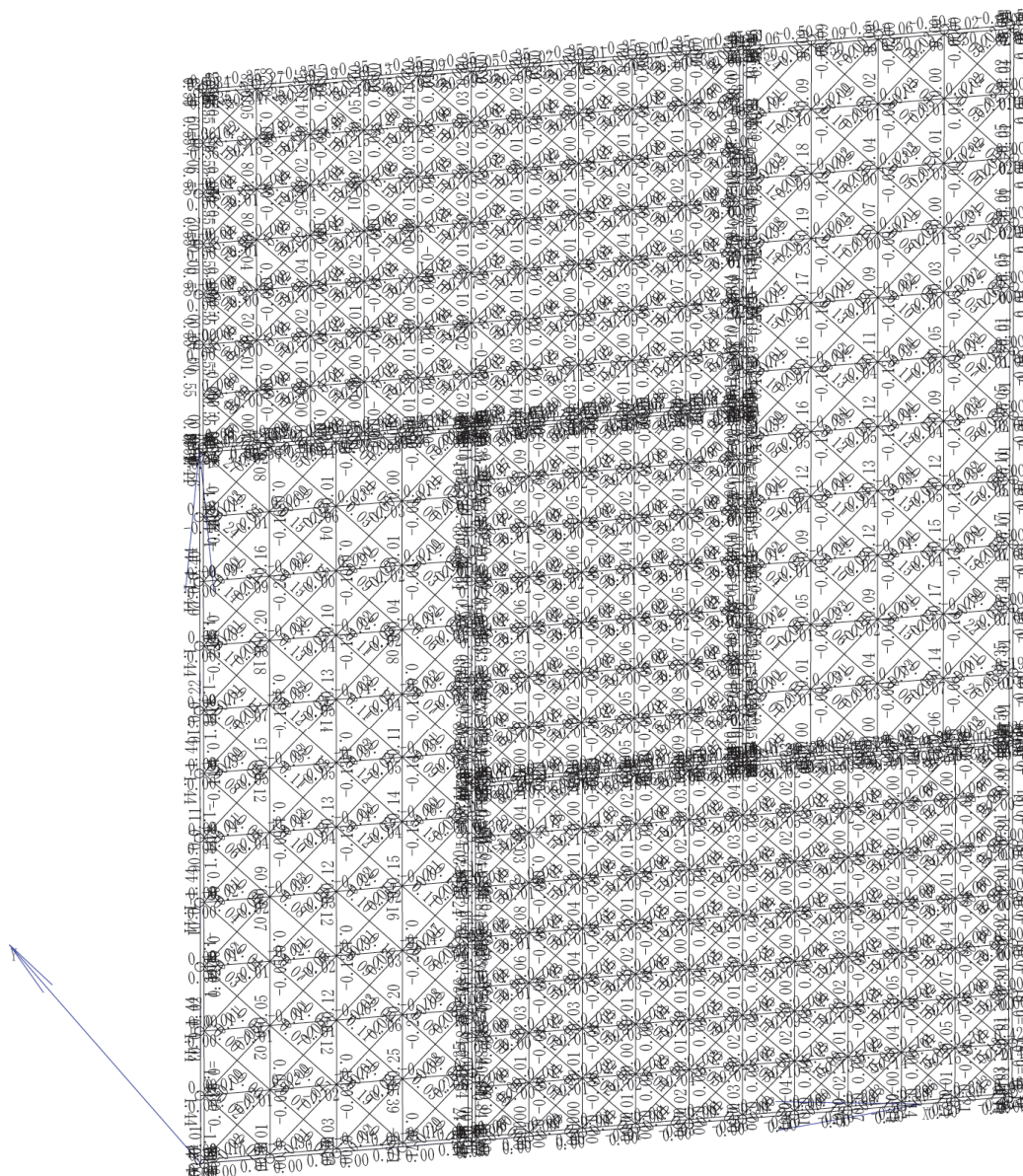


変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 109: Multi103 の変形図



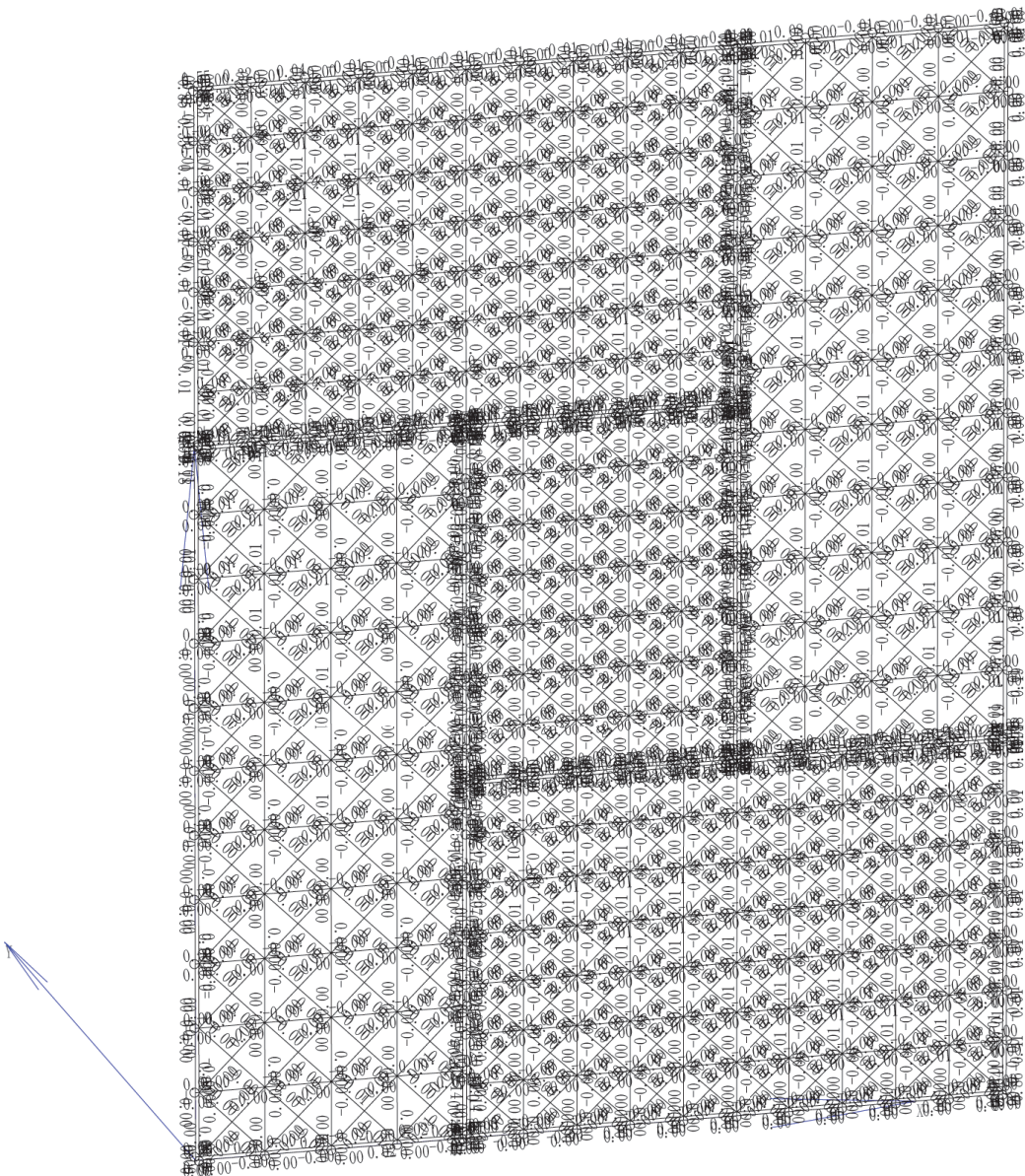
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 110: Multi103 の軸力図

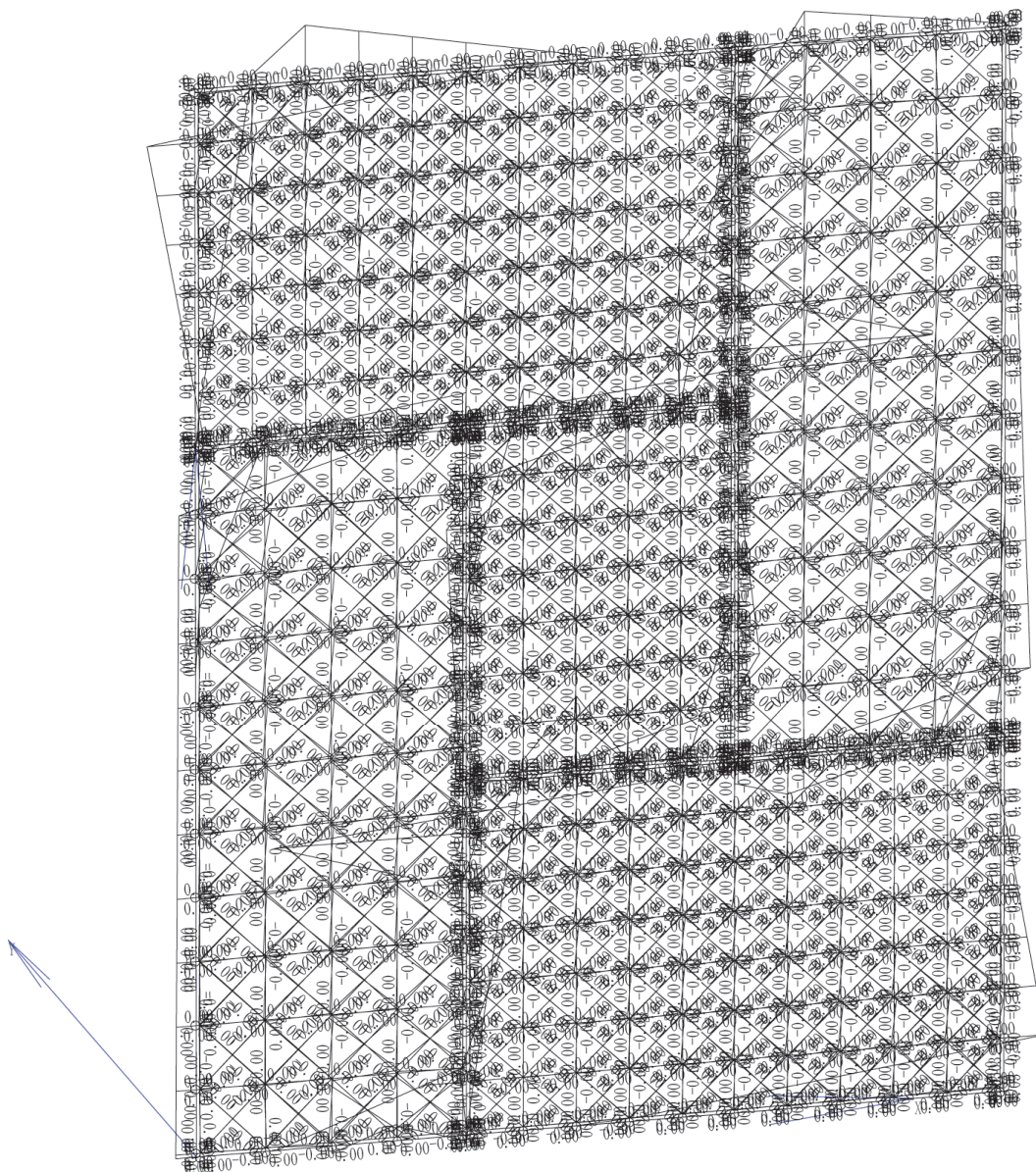
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 111: Multi103 の Q 図

曲げモーメント図

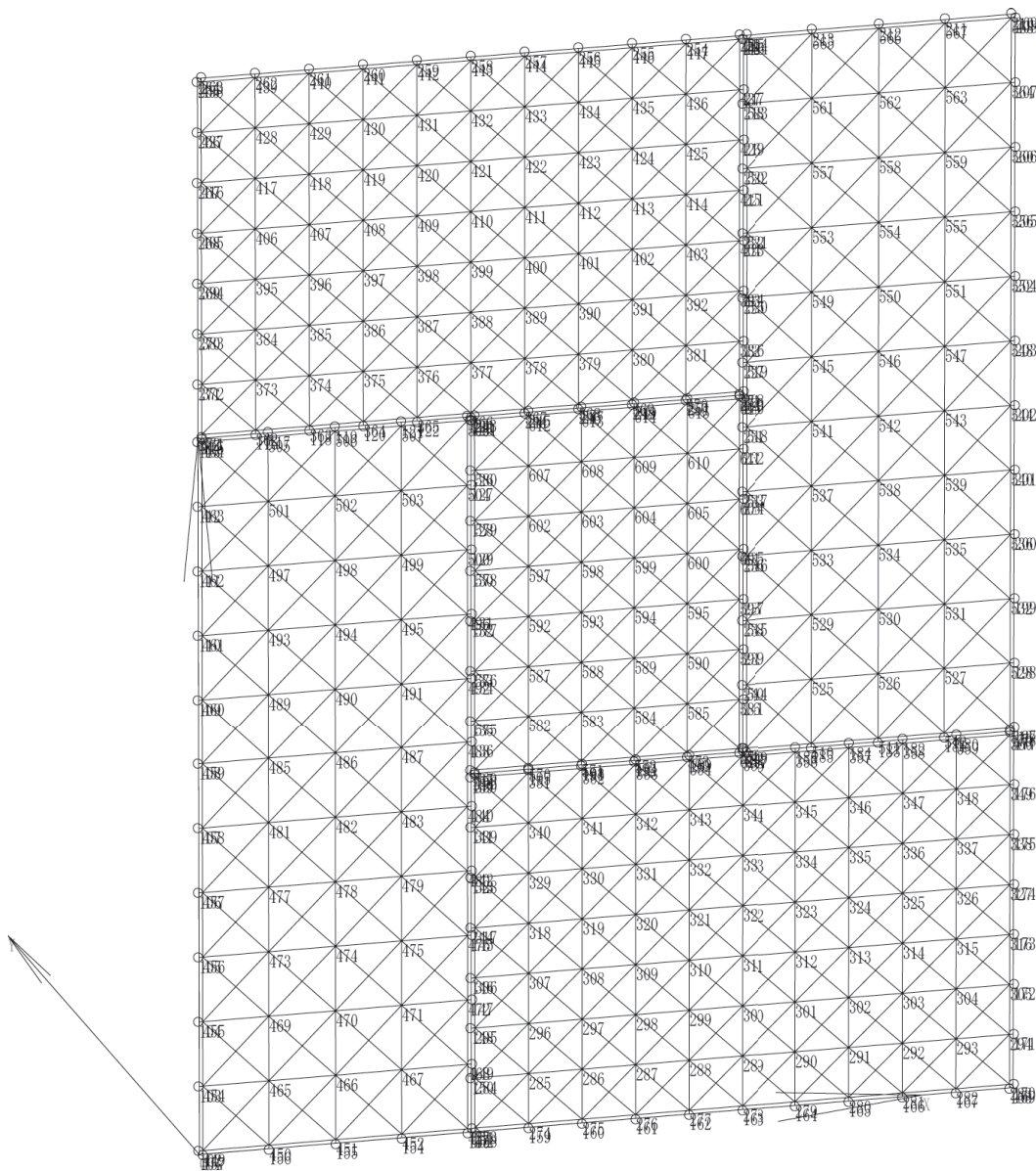


曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 112: Multi103 の M 図

■Multi104 の解析モデルと解析結果

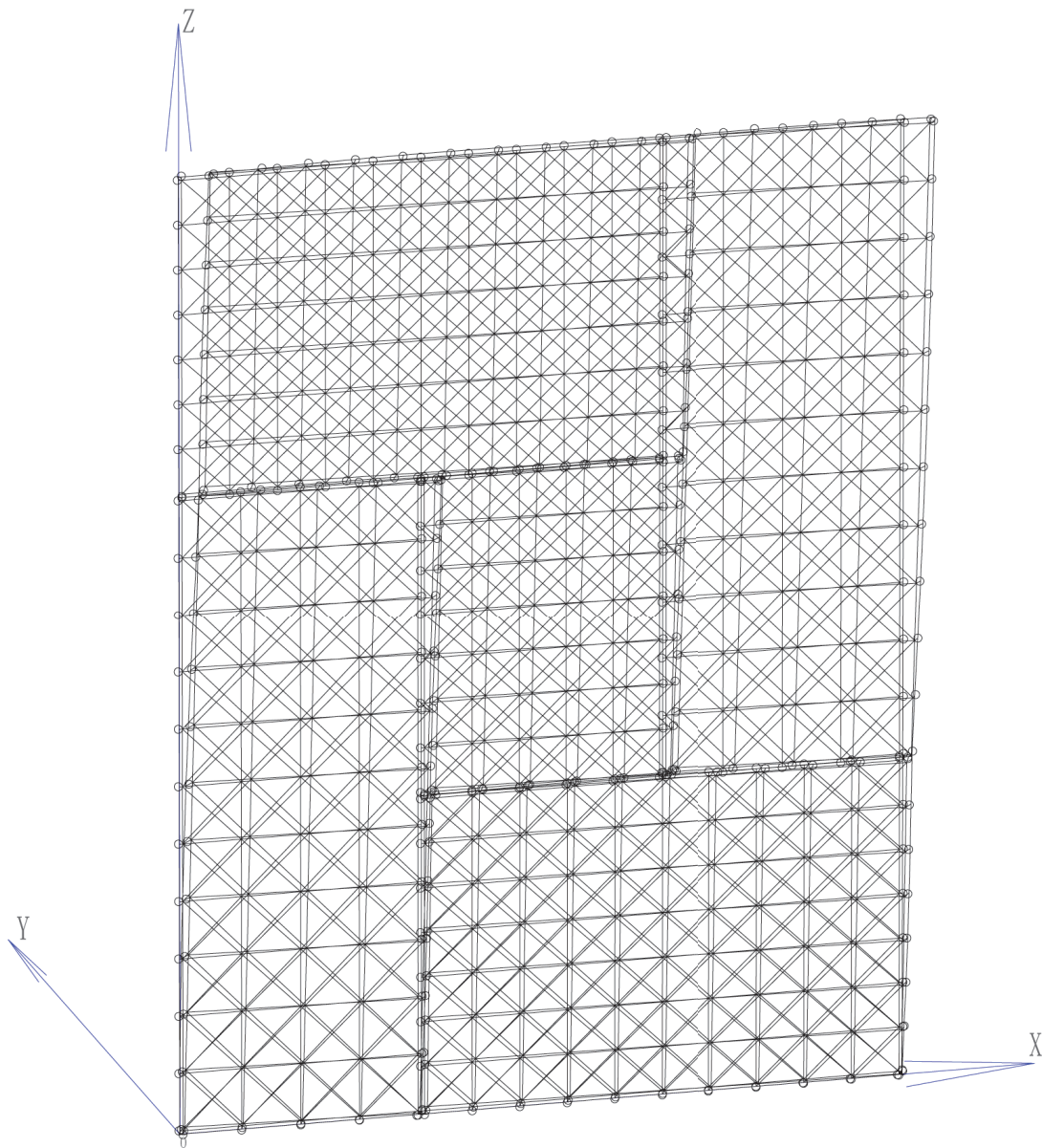
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 113: Multi104 解析モデル図

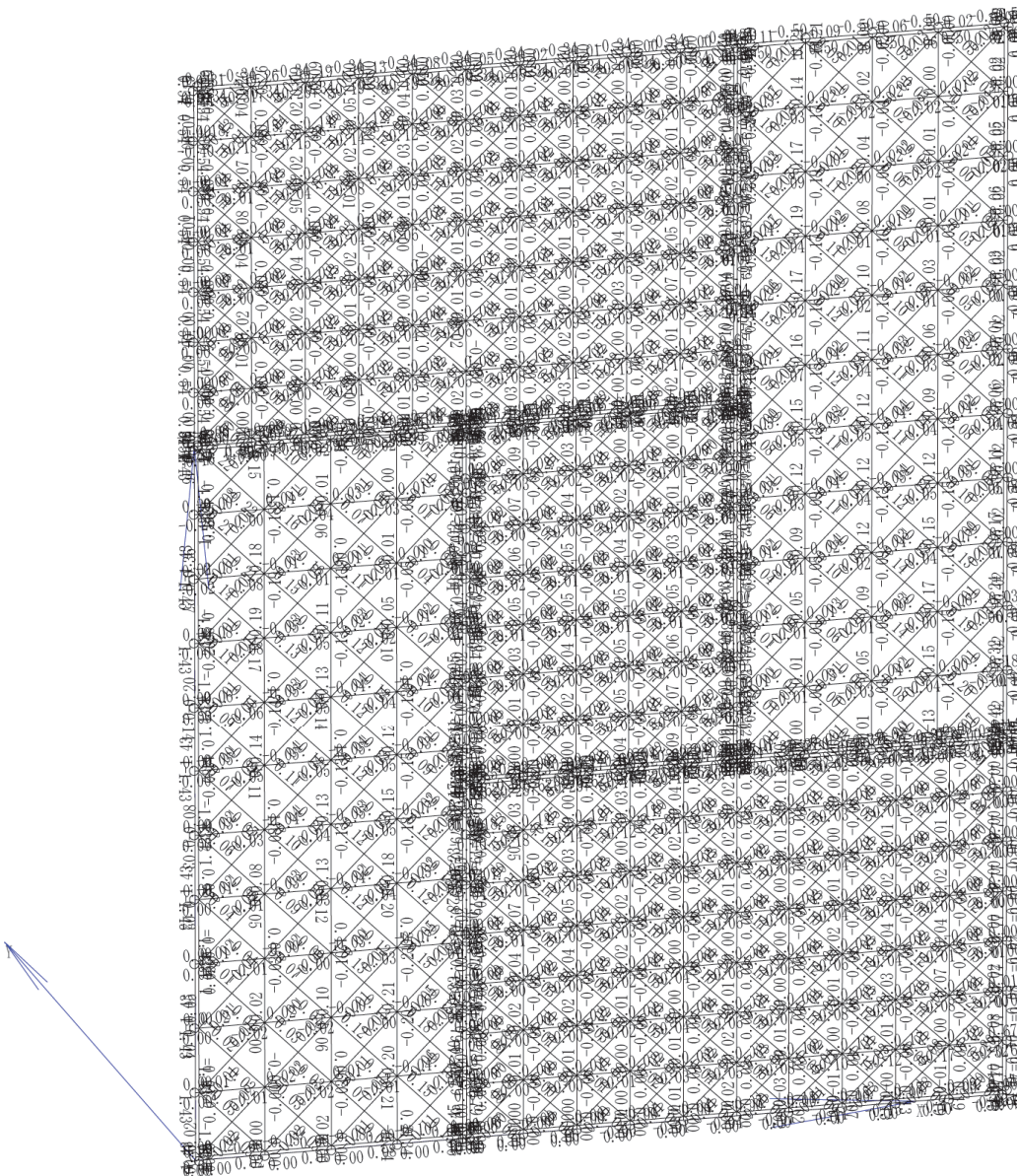
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 114: Multi104 の変形図

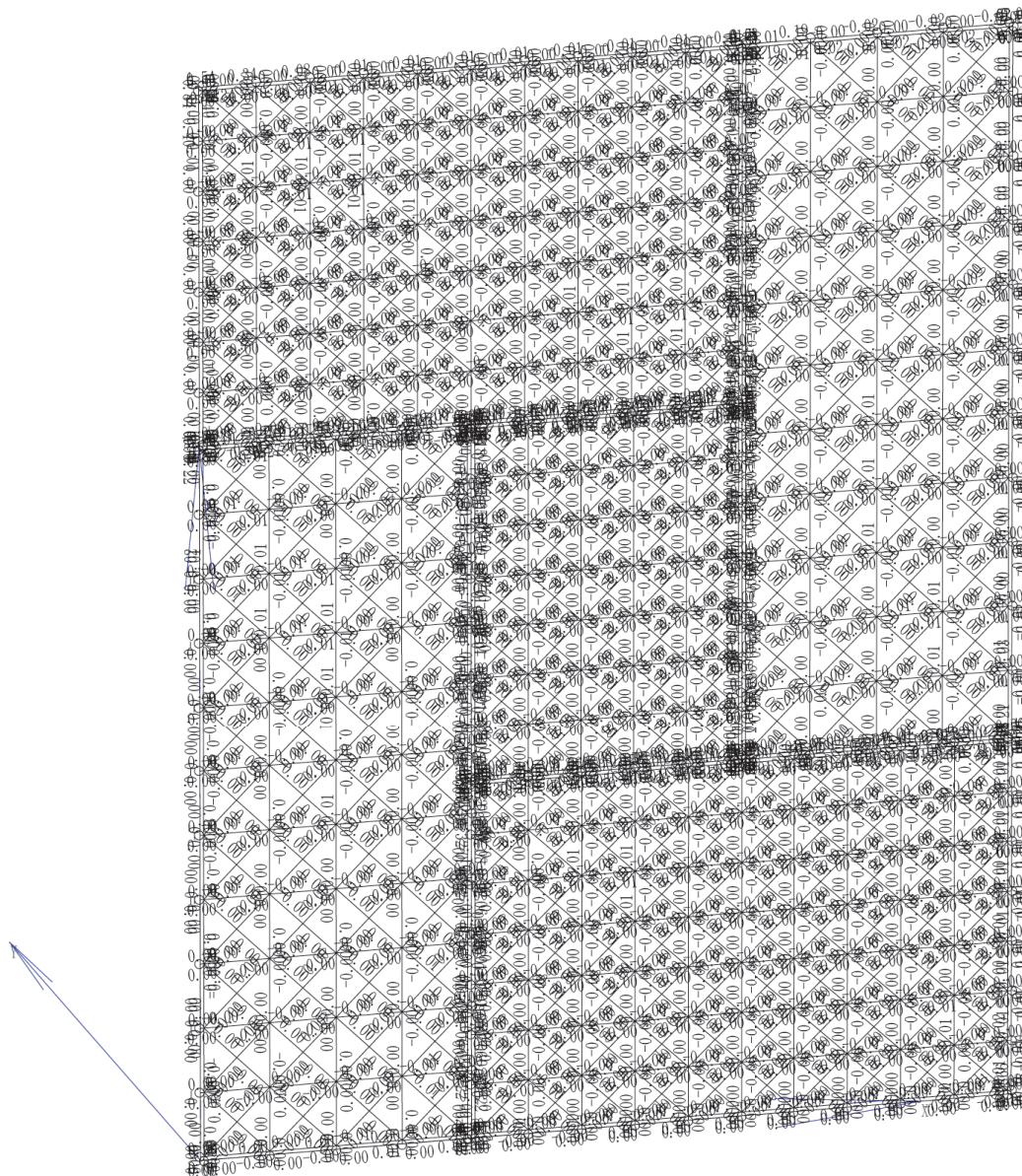
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 115: Multi104 の軸力図

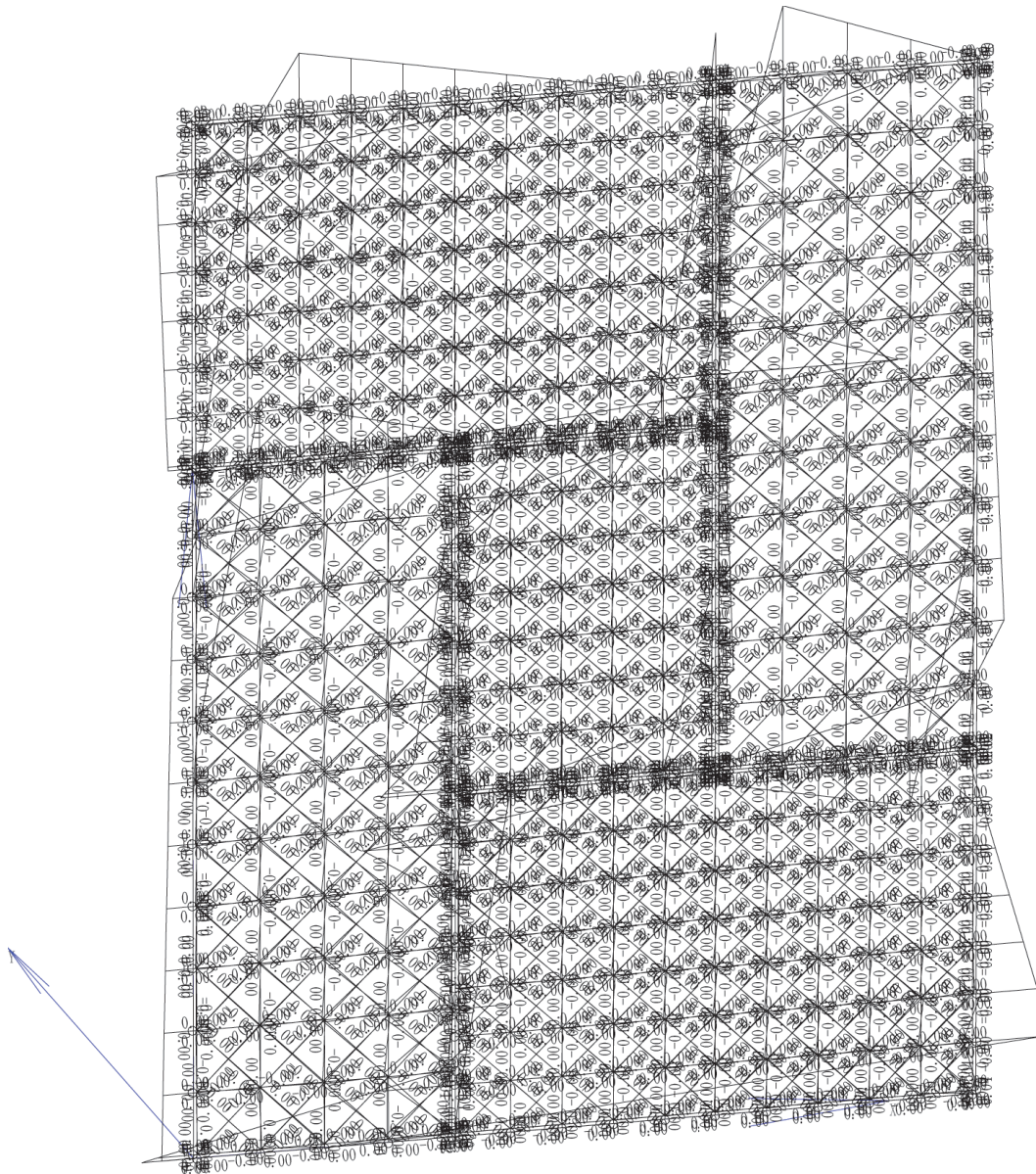
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，床

図 116: Multi104 の Q 図

曲げモーメント図



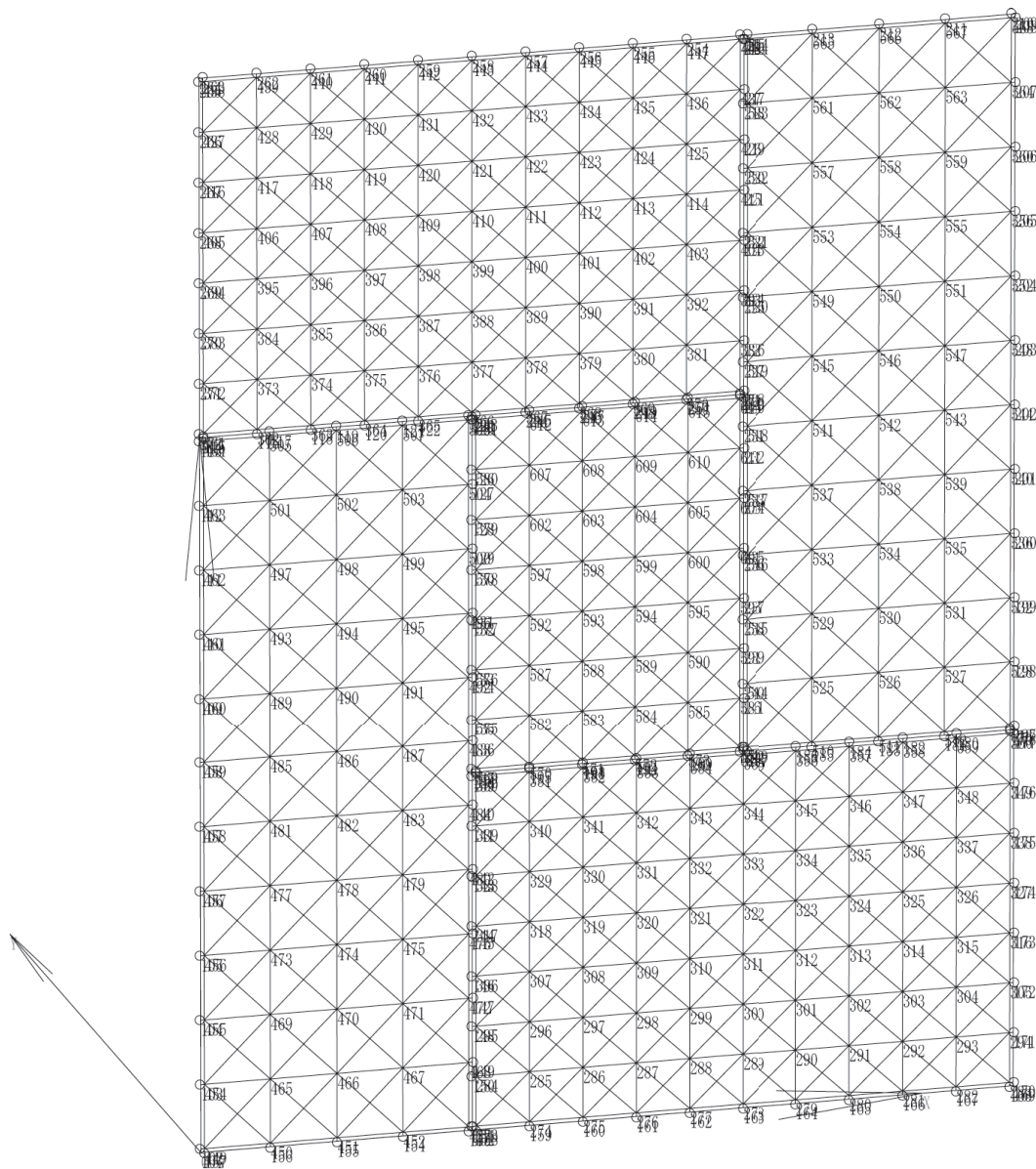
曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 117: Multi104 の M 図



■Multi105 の解析モデルと解析結果

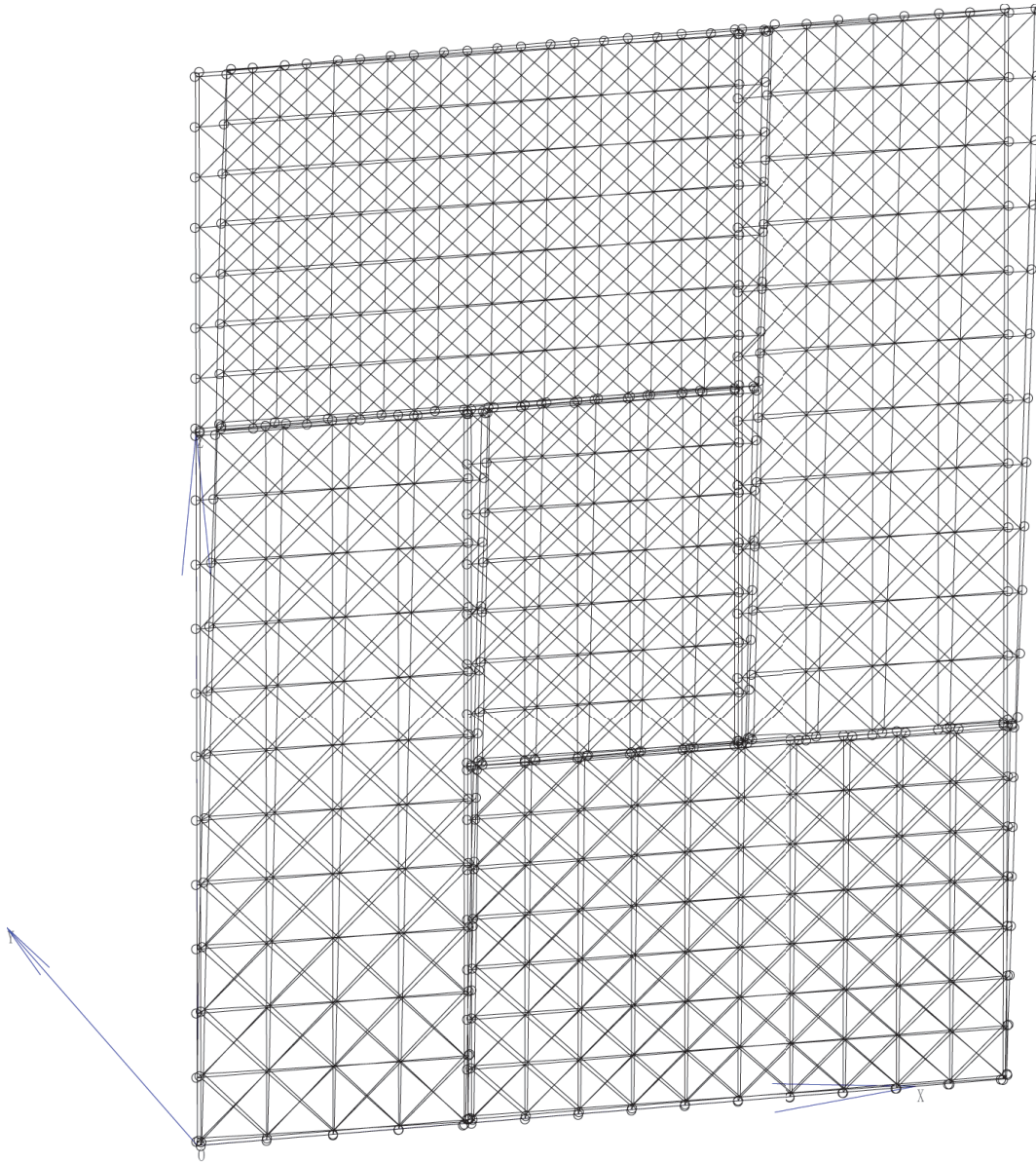
解析モデル



節点番号  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 118: Multi105 解析モデル図

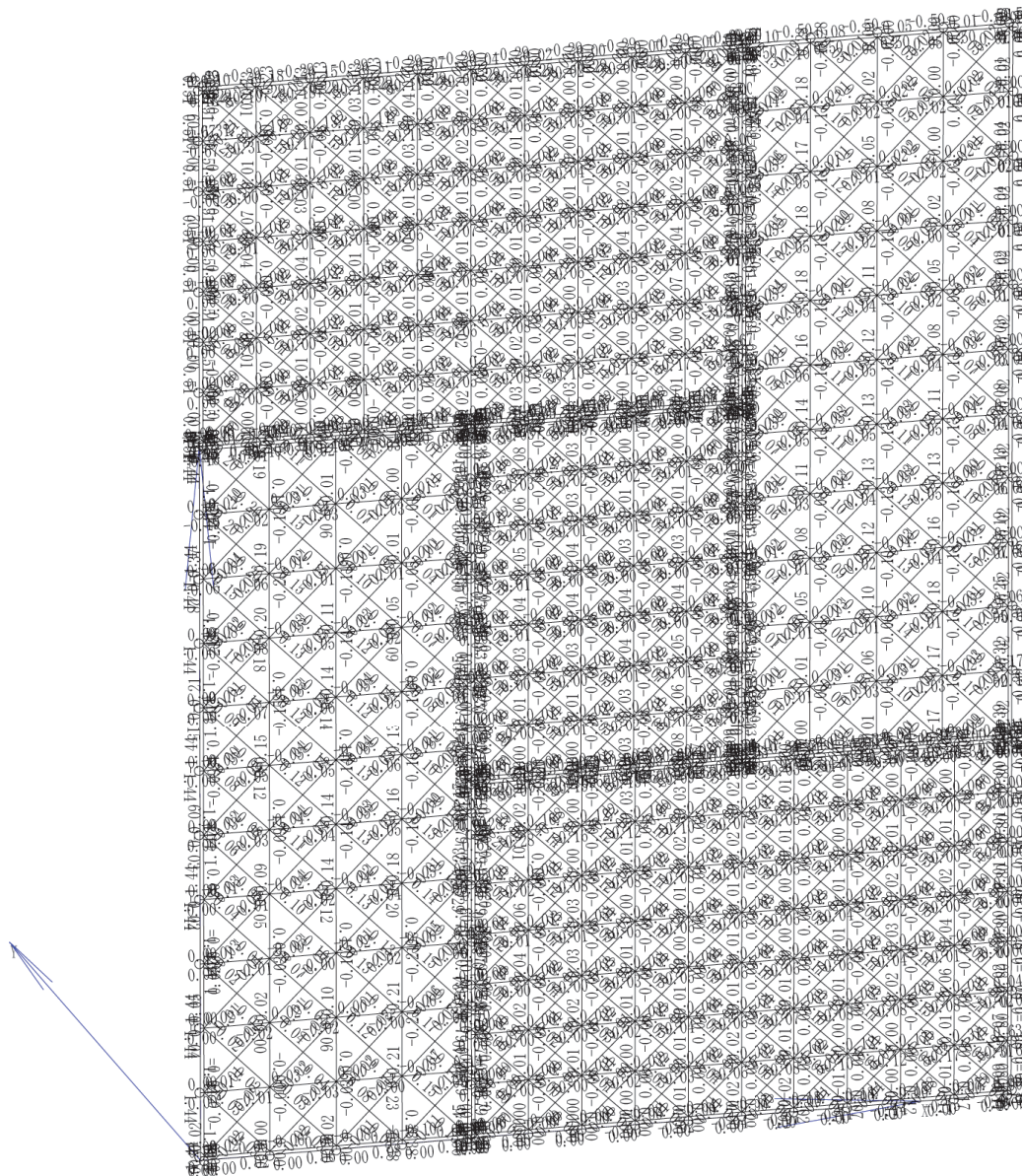
変形図



変形図  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 119: Multi105 の変形図

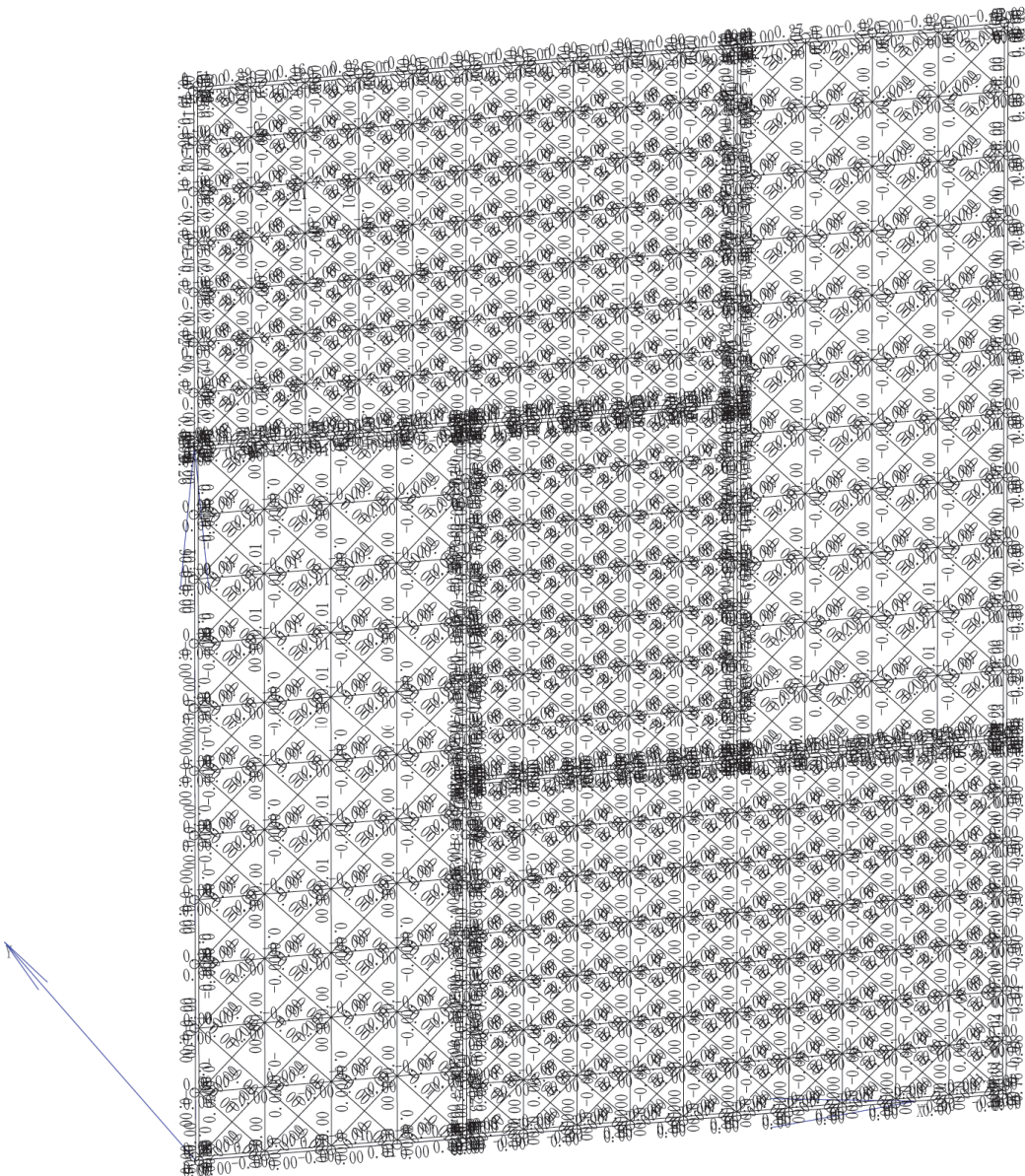
軸力図



軸力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 120: Multi105 の軸力図

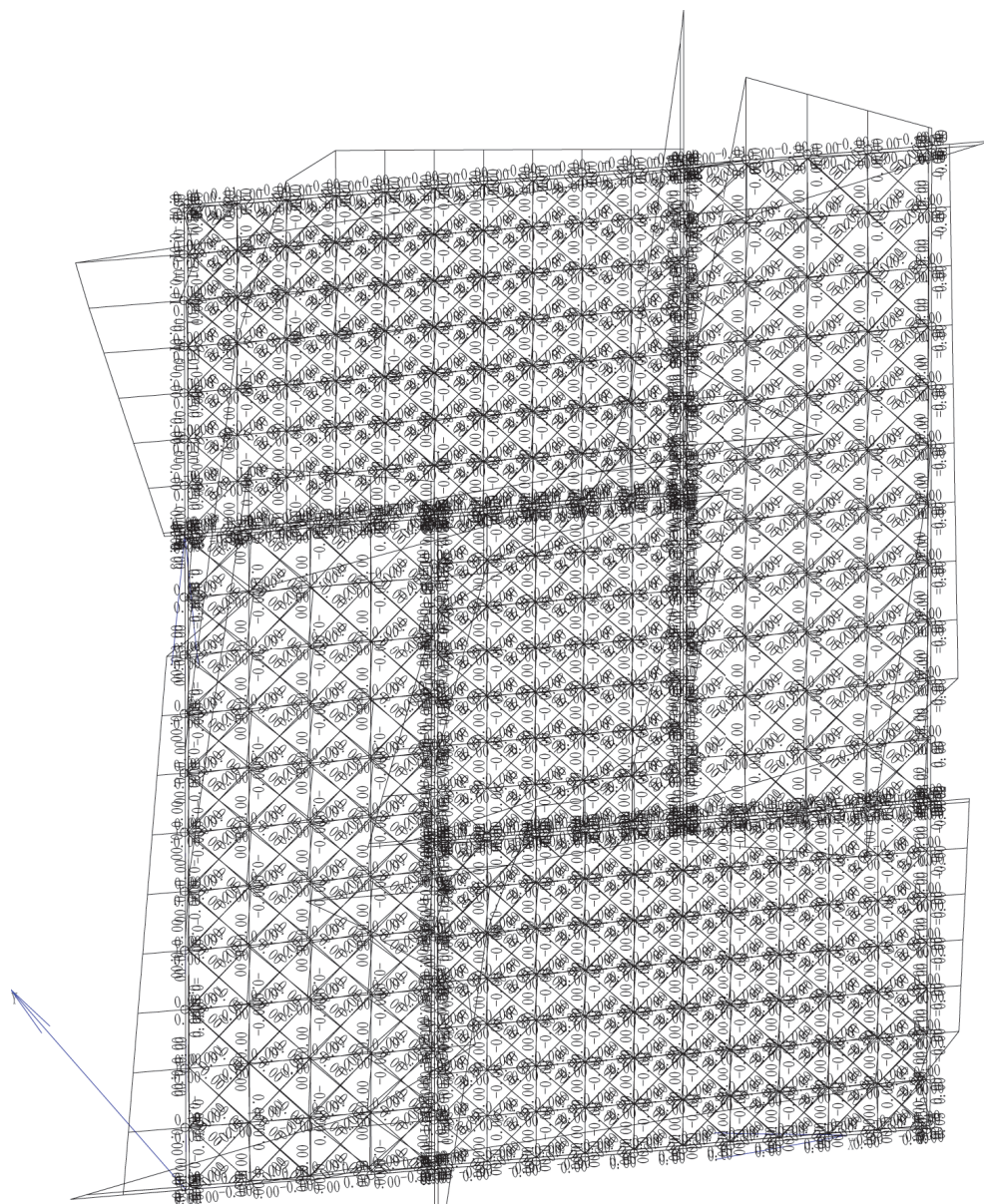
せん断力図



せん断力 [tf]  
表示部材：柱，梁，ブレース，壁，床

図 121: Multi105 の Q 図

曲げモーメント図



曲げモーメント [tfm]  
表示部材：柱，梁，プレート，壁，床

図 122: Multi105 の M 図

## 4.4 実験結果と解析結果の分析と考察

凹型試験体の実験結果と解析結果について、フランジ幅  $B$  と初期剛性  $K$  の関係を以下の表 10 にまとめる。  
なお座屈荷重  $P_{cr}$  の単位は  $kN$ 、初期剛性  $K$  の単位は  $kN/mm$  である。

表 10: 凹型試験体の実験結果と解析結果

| フランジ幅 $B$ | $K$ (実験結果)(試験体名)               | $K$ (解析値) |
|-----------|--------------------------------|-----------|
| 12        | 0.98 (試験体 201 <sup>20)</sup> ) | 0.75      |
|           | 0.75 (試験体 202)                 |           |
|           | 0.74 (試験体 203)                 |           |
|           | 0.74 (試験体 301 <sup>23)</sup> ) |           |
|           | 0.75 (試験体 302 <sup>23)</sup> ) |           |
| 16        | 0.85 (試験体 204 <sup>22)</sup> ) | 0.82      |
| 20        | 0.98 (試験体 205 <sup>20)</sup> ) | 0.89      |
|           | 0.85 (試験体 206)                 |           |
| 24        | 1.08 (試験体 207 <sup>23)</sup> ) | 0.98      |
| 30        | -                              | 1.14      |

4.4.1 フランジ幅 B と初期剛性 K の関係

解析結果について、凹型試験体の実験と静的解析の結果について考察を行う。実験と解析において、双方ともにフランジ幅が大きくなると初期剛性も線形に大きくなるが、凹型試験体のすべての実験で測定された初期剛性  $K$  とフランジ幅  $B$  の関係と解析で得られた初期剛性  $K$  とフランジ幅  $B$  の関係についてプロットしてみると図 123 のように、非常に良い対応を示した。以下にすべての実験における荷重変形曲線とその初期剛性、および損傷状況図を示す。

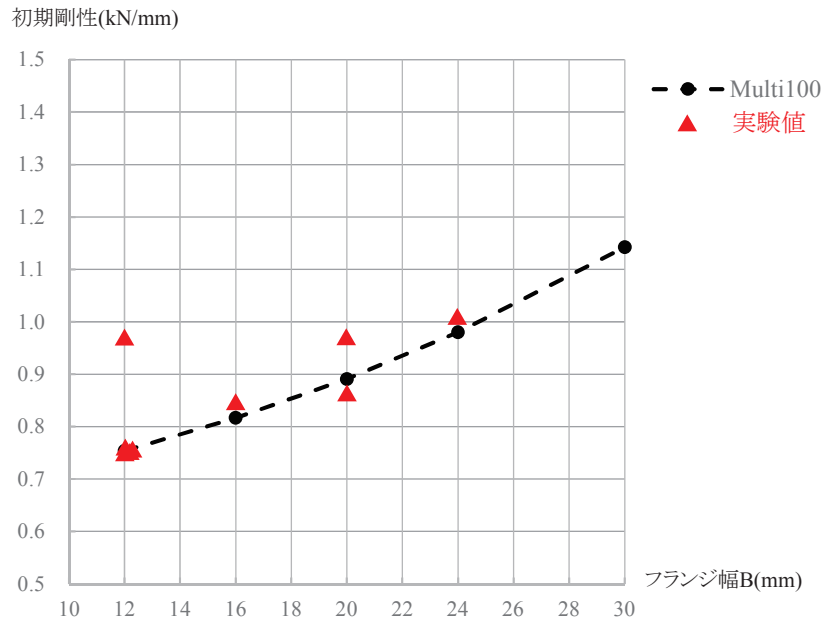


図 123: フランジ幅 B と初期剛性 K の関係

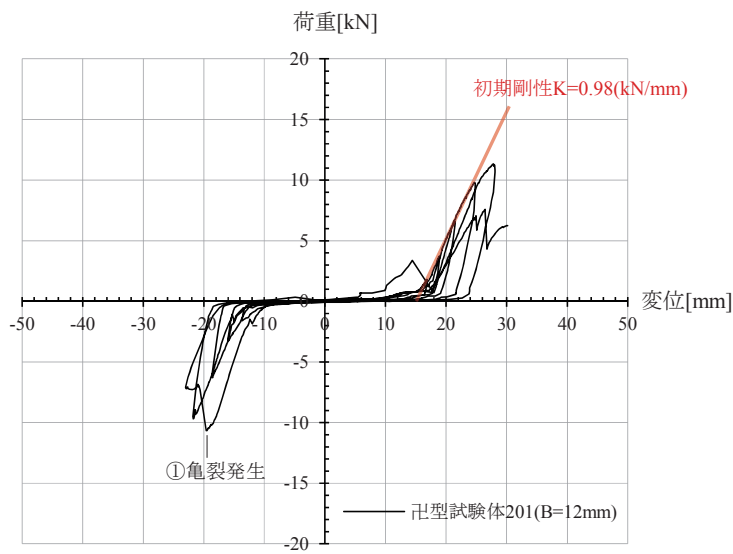


図 124: 試験体 201 荷重変形曲線

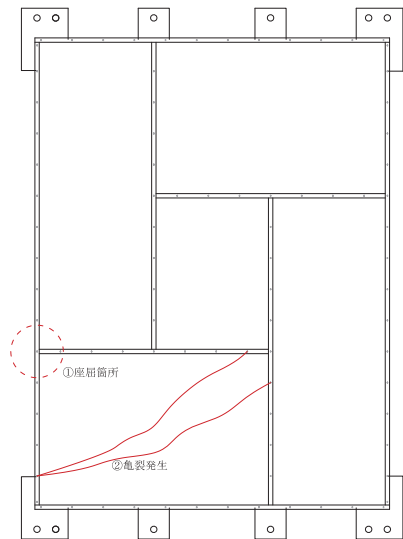


図 125: 試験体 201 の損傷状況図

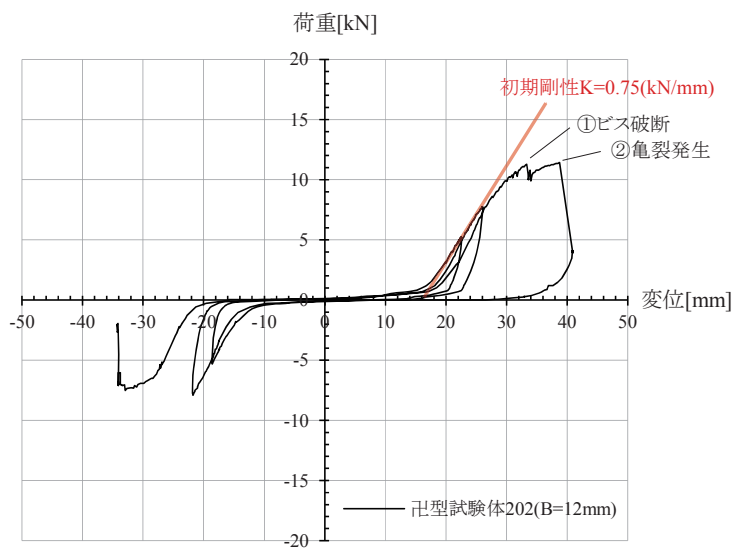


図 126: 試験体 202 荷重変形曲線

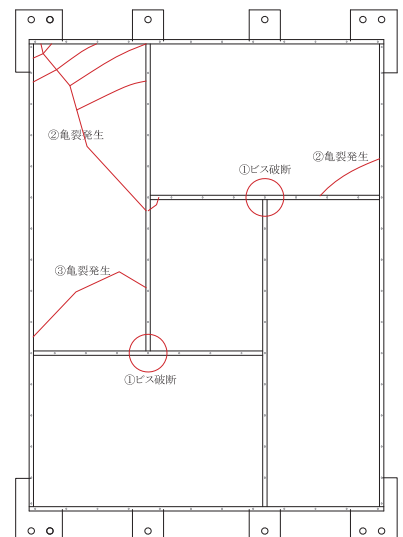


図 127: 試験体 203 損傷状況図



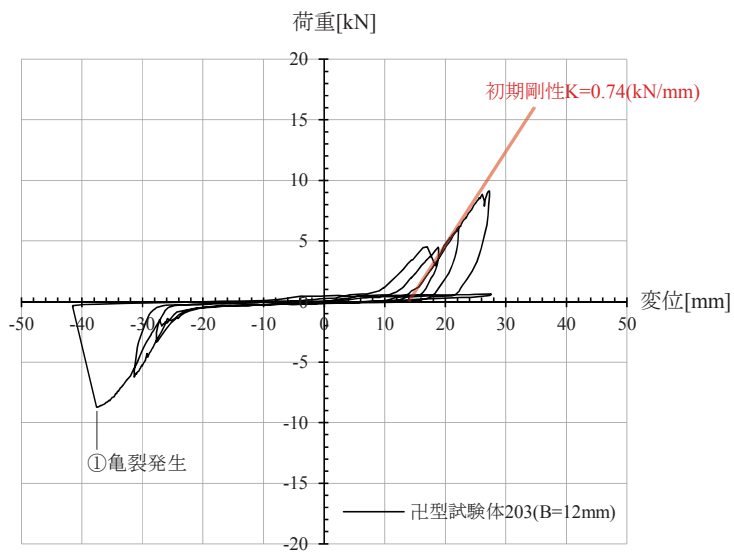


図 128: 試験体 203 荷重変形曲線

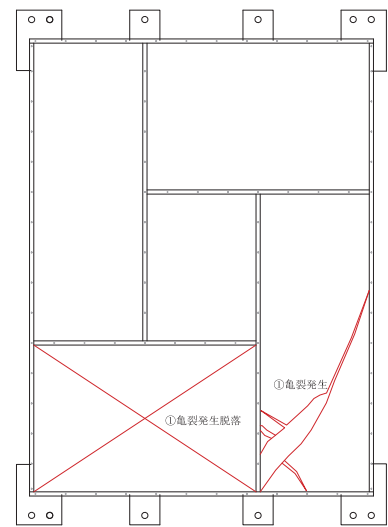


図 129: 試験体 203 損傷状況図

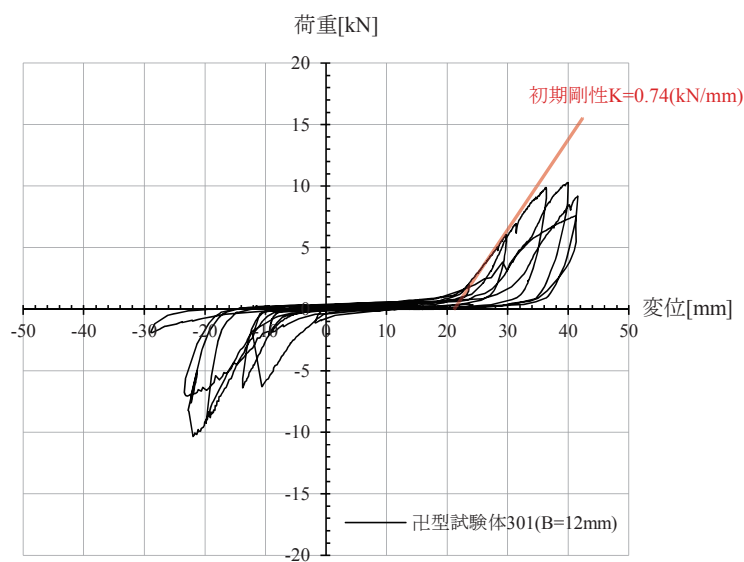


図 130: 試験体 301 荷重変形曲線

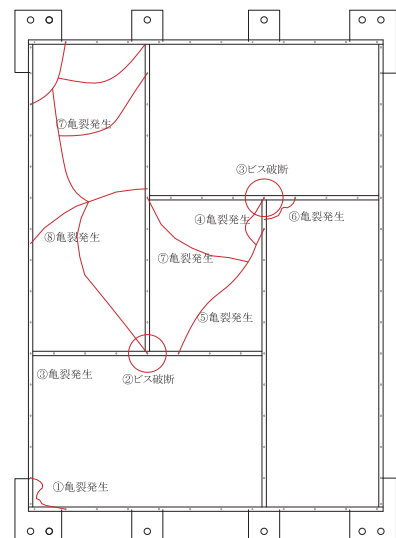


図 131: 試験体 301 の損傷状況図

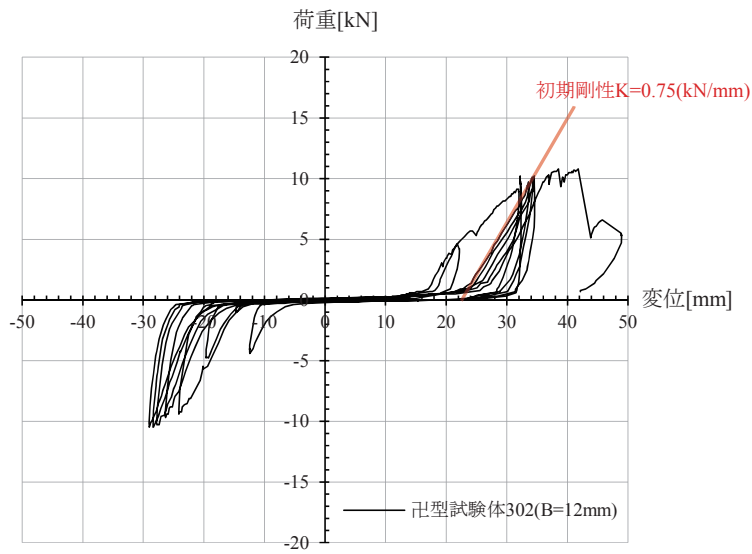


図 132: 試験体 302 の荷重変形曲線

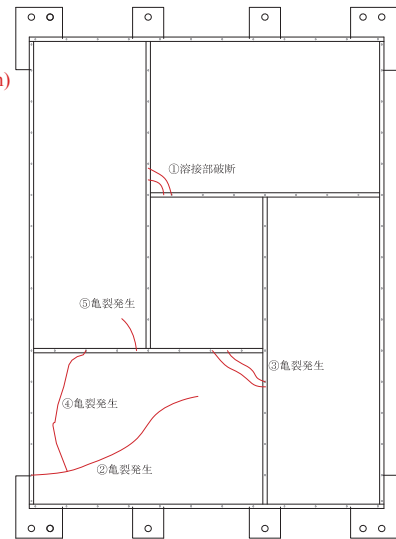


図 133: 試験体 302 の損傷状況図

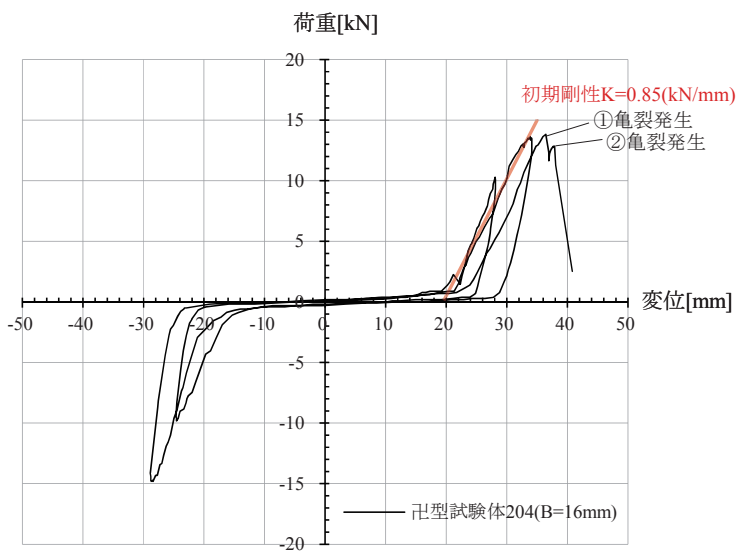


図 134: 試験体 204 の荷重変形曲線

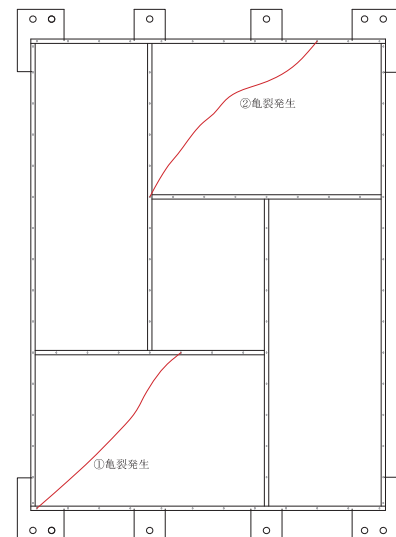


図 135: 試験体 204 の損傷状況図

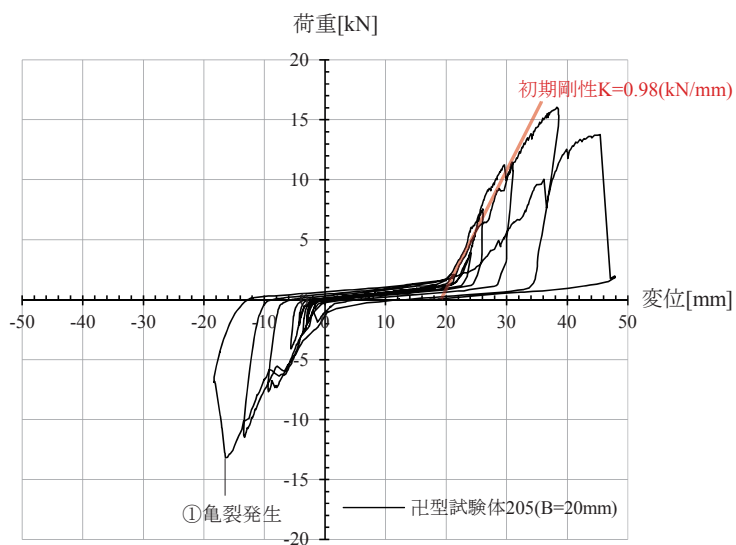


図 136: 試験体 205 の荷重変形曲線

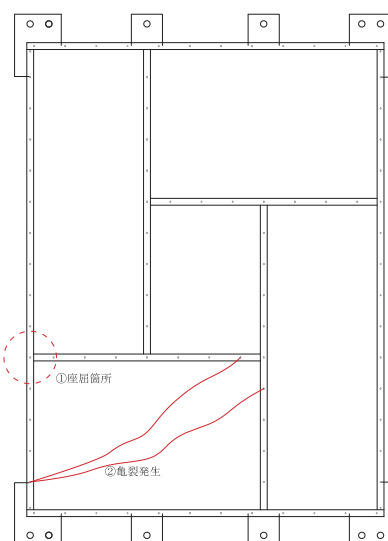


図 137: 試験体 205 の損傷状況図

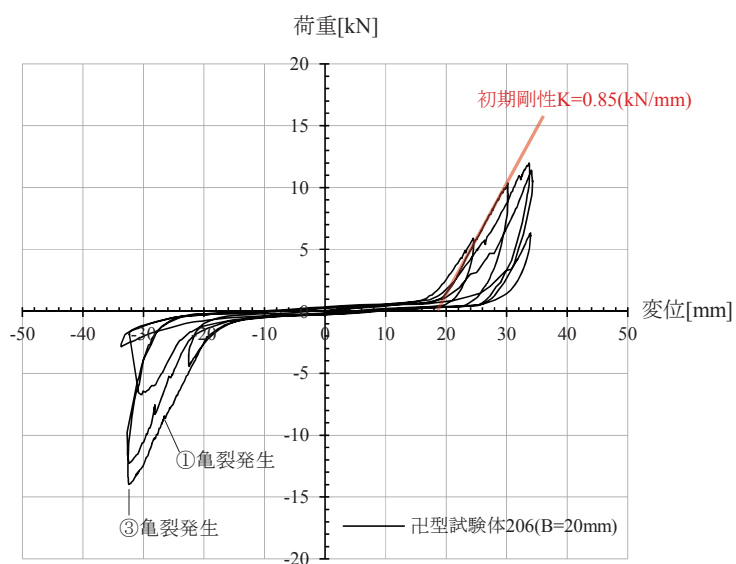


図 138: 試験体 206 荷重変形曲線

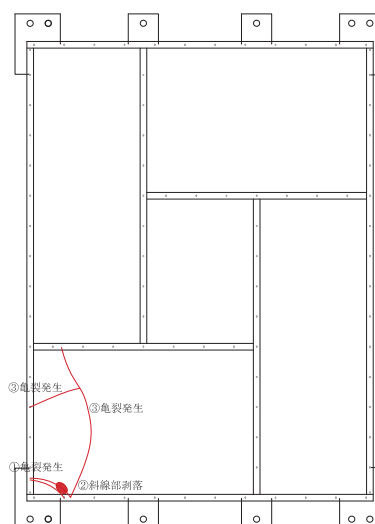


図 139: 試験体 206 損傷状況図

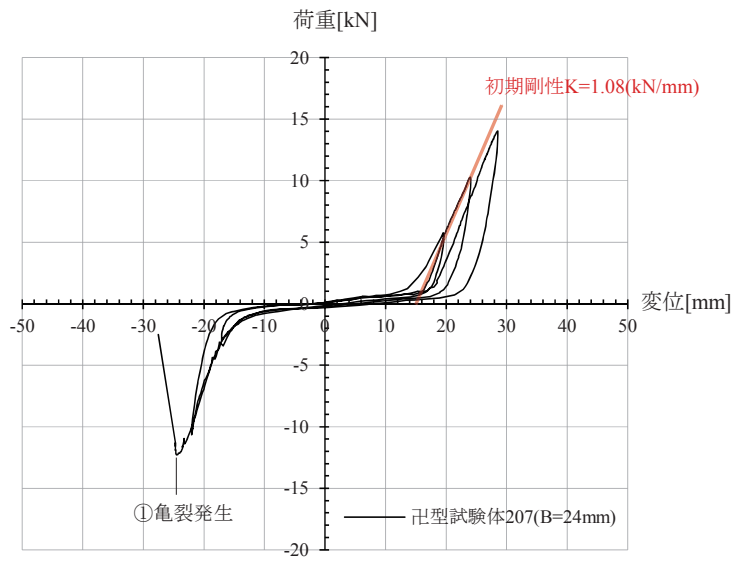


図 140: 試験体 207 の荷重変形曲線

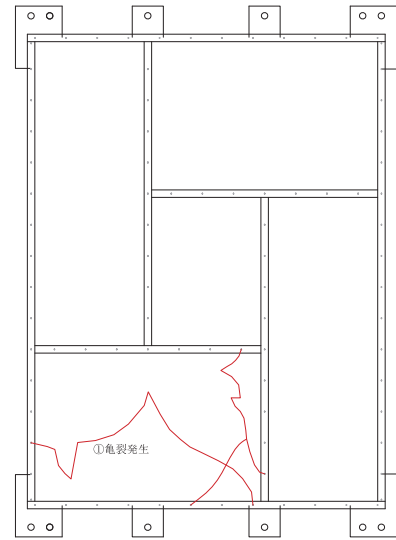


図 141: 試験体 207 の損傷状況図

#### 4.5 結語

第4章では、まず凹型試験体の実験概要と実験結果について、次に第3章と同様に、第2章において緩衝材としての錫とガラス面外変形のフランジによる拘束機構をモデル化した詳細解析モデルを用いて静的解析を行い、解析結果と実験結果とを照らし合わせ分析した。

また分析の結果、凹型試験体における実験結果と解析結果で、フランジ幅  $B$  と初期剛性  $K$  の関係は非常に良い対応を示すことを確認した。

以上の第3章と本章での結果についての分析から、次章において結論を纏める。

## 第5章 結論

既往の研究<sup>23)</sup>におけるステンドグラス状耐力壁の初期剛性は剛性低減係数  $\alpha_t = 1/20$  をもちいて解析を行うことで、実験値と解析値がよい対応をとることが示されてきたが、剛性低減係数  $\alpha_t = 1/20$  と錫の挙動についての定量的な関係については未解明であった。またガラス部材の座屈長さ係数に関しては実験値から帰納的に定められてきた。

そこで本研究では、緩衝材としての錫部材、ガラスの面外変形を拘束する鋼製骨組のフランジ部材をモデル化した詳細な解析モデルを作成し、解析を行った。すなわち、錫部材については材料圧縮実験の結果から得られた応力歪曲線の結果から錫のヤング係数  $E_{tin}$  をトリリニアな非線形材料として、フランジ部材についてはガラスの面外への変形を拘束する剛体としてモデル化を行い、静的解析および線形座屈解析を行った。

そこで得られた解析結果の初期剛性および座屈荷重が、実験結果と非常に良い対応をとったことから、ステンドグラス状耐力壁の挙動について、本研究で提案したモデル化の方法および解析により、実験結果を再現できる可能性を示したといえる。

## 第6章 今後の課題

上で述べたように、ガラスの面外変形を拘束するフランジ部材をモデル化することによって、要素試験体においても座屈荷重が概ね一致することが確認された。

しかしながら実験で確認されている座屈は面外にはらみだすような座屈であるが、座屈解析結果の座屈モード図では、圧縮側の鋼材が面内にはらみだす形の座屈モードとなっている。試験体 101~103 の実験においては、ガラスは外れこそしないものの圧縮側の鋼材は面内に変形しながら面外にはらみ出し、面内の荷重変形曲線の勾配が小さくなる点と面外の荷重変形曲線の勾配が小さくなる点はほぼ同程度の荷重で起こっていることから、この解析は妥当であると考えられる。ただし、解析では鋼材が面外にはらみだす座屈でなく、面内に鋼材が座屈するようなモードになることの定量的な説明はできていない。

また、スタンドグラス状耐力壁に水平荷重を載荷した際にはガラスの面外変形はまず H 型鋼のフランジに接触する形で拘束され、フランジに伝わった力は H 型鋼に伝達され、H 型鋼の断面二次モーメント(強軸)で座屈を拘束する。(図 20) すなわち、ガラスは H 型鋼によって 2 種類の座屈拘束を受けているといえるが、今回の解析モデルではフランジの剛性は無限大としているため、前者の拘束効果は反映できていない。

本研究で扱っている鋼製骨組のフランジによるガラスの呑み込み深さはフランジが 24mm の場合でも 8.75mm 程度とガラスの厚みと大差ないため、フランジによるガラスの呑み込みによる座屈拘束効果は非常に小さいとも考えられる。<sup>14)</sup> この点に関して詳細な検討を行う為にはフランジ幅をさらに大きくした試験体についての実験を行い、フランジによるガラスの呑み込み深さを反映したモデル化と解析を行うことなどが必要である。

また要素試験体および、H 型試験体ともに実験結果と解析結果の初期剛性が非常に良い対応をとるモデル化の方法を示したが、既往研究における剛性低減係数  $\alpha_t$  について、 $\alpha_t=1/20$ (すなわち錫のヤング係数  $E_{tin}=9.8\text{N/mm}^2$  程度) とすれば実験値と解析値が良い対応をとることについての定量的な説明はできていない。そのため周囲に配置した錫の応力分布やガラスがブレースとして働くときの隅部の挙動について詳細に調べることなどが今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- 1) [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/Chartres\\_-\\_cathedrale\\_-\\_rosace\\_nord.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/Chartres_-_cathedrale_-_rosace_nord.jpg)
- 2) [https://commons.wikimedia.org/wiki/Crystal\\_Palace/media/Crystal\\_Palace\\_Great\\_Exhibition\\_tree\\_1851.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/Crystal_Palace/media/Crystal_Palace_Great_Exhibition_tree_1851.png)
- 3) <http://www.loc.gov/pictures/collection/highsm/item/2010630115/>
- 4) [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/b/be/Duchamp\\_LargeGlass.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/b/be/Duchamp_LargeGlass.jpg)
- 5) [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/0/03/Picabia\\_Hera\\_2.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/0/03/Picabia_Hera_2.JPG)
- 6) マルセル・デュシャン, “デュシャンは語る”, ちくま学芸文庫, 1999
- 7) コーリン・ロウ、伊東 豊雄 (翻訳)、松永 安光 (翻訳), “マニエリスムと近代建築”, 彰国社, 1981
- 8) 安井至、小川晋永、国分可紀、近藤敬、寺井良平、山根正之、和田正道, “ガラス工学ハンドブック”, 朝倉書店, 1999
- 9) 旭硝子株式会社, “建築ガラスカタログ技術資料編”
- 10) 長倉三郎、井口洋夫、江沢洋、岩村秀、佐藤文隆、久保亮五, “岩波 理化学辞典”, 岩波書店, 1998
- 11) 山中昌之、田中眞夫、和久井智、和田章ほか, “ガラスと粘弾性体を用いた透明制振壁の研究その 1-5”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2001
- 12) 山中昌之、田中眞夫、和久井智、和田章ほか, “ガラスと粘弾性体を用いた透明制振壁の研究その 6-7”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2002
- 13) 藤田大、久田隆司、上杉英樹ほか, “ガラス柱の座屈荷重に関する実験”, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2002
- 14) 加藤英美、久田隆司, “ガラスの座屈挙動に関する解析的研究その 1”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2004
- 15) 瀬川紘史、久田隆司、上杉英樹ほか, “水平力を受ける強化板ガラス壁の荷重支持能力に関する実験”, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2005
- 16) 福島佳浩、伊山潤, “ガラスによる鋼材の座屈補剛効果”, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2008
- 17) 福島佳浩、伊山潤, “ガラスによる鋼材の座屈補剛-ガラスに生じるひび割れの解析的考察-”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2009
- 18) 黒後貴広、朝光拓也、福山智子、佐藤淳, “ガラス板が拘束された骨組の力学的性状”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2011
- 19) 本田幾久世、朝光拓也、福山智子、金容善、佐藤淳, “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”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2012
- 20) 岩永陽輔、佐藤淳, “ガラス板が拘束された金属骨組の骨格曲線を再現するモデル化”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2013
- 21) 佐藤淳, “鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体の設計法に関する研究”, 2013
- 22) アントニ、佐藤淳, “鋼製骨組にガラスが拘束された構造体のモデル化における緩衝材の剛性と座屈拘束効果”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2014
- 23) 孫、佐藤淳, “鋼製骨組にガラス板が拘束された構造体のモデル化における座屈拘束効果と  $D_s$  値の設定法”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015
- 24) 佐藤淳, “佐藤淳 | 佐藤淳構造設計事務所のアイテム”, INAX 出版, 2010
- 25) 中谷 礼仁, “セヴェラルネス + - 事物連鎖と都市・建築・人間”, 鹿島出版会, 2011
- 26) 金箱温春、小河利行、竹内徹、松原洋介, “せん断力を受ける部分支持された薄鋼板の座屈耐力及び座屈後



- 耐力評価”, 日本建築学会構造系論文集, 2006
- 27) 金箱温春、小河利行、竹内徹、松原洋介, “アスペクト比の異なる部分支持された薄鋼板のせん断座屈耐力及び座屈後耐力評価”, 日本建築学会構造系論文集, 2007
- 28) 日本建築学会, “鋼構造座屈設計指針”, 日本建築学会, 2009
- 29) 半谷 裕彦, “平板の基礎理論 (平板構造シリーズ)”, 彰国社, 1995
- 30) 川井 忠彦、藤谷 義信, “座屈問題解析 (有限要素法の基礎と応用シリーズ)”, 培風館, 1991
- 31) 藤井 文夫、池田 清宏、大崎 純, “構造と材料の分岐力学 (計算工学シリーズ)”, コロナ社, 2005
- 32) 池田 清宏、室田 一雄, “構造系の座屈と分岐”, コロナ社, 2001
- 33) 桑村 仁, “鋼構造の性能と設計”, 共立出版, 2002
- 34) S.P. ティモシェンコ、J.N. グーディア、金多 潔 (監訳), “弾性論”, コロナ社, 1973
- 35) S.P. ティモシェンコ、最上 武雄 (翻訳)、川口 昌宏 (翻訳), “材料力学史”, コロナ社, 1973
- 36) チモシェンコ・ヴォアノフスキー、長谷川 節 (訳), “板とシェル理論 上・下”, ブレイン図書出版, 1998

## 謝辞

本論文をこのように纏め上げることができたのは、少なからざる方々の暖かいご助言や、ご協力のおかげであり、私1人では到底完遂することができるものではありませんでした。本論文の締めくくりにあたり、御指導、ご鞭撻して下さったすべての方々に感謝の意を示し、謝辞にかえさせていただきます。

はじめに、東京大学淳教授 佐藤淳先生には、本論文の指導教員として大学院2年間とごく短い期間でしたが、終始懇切丁寧でこの上ない熱いご指導、ご鞭撻を賜り、感謝の言葉を申し上げます。私が佐藤研究室に所属し研究を始めるにあたり、ステンドグラス耐力壁についての研究テーマを与えてくださり、このテーマを通じて理論の構築法や現象の捉え方など、非常に多くのことを学ばせていただきました。自分の至らなさを痛感しながらも、充実した研究生活を送ることができたことは偏に佐藤先生のおかげであり、先生の下で勉強できたことを幸せに思い、心より感謝申し上げます。

また、東京大学准教授 清家剛先生 同准教授 藤田香織先生には、構法系研究室会議において、研究内容や論文の構成などについて多くの貴重なご意見、ご指摘を賜り、よりよい論文を作成することができました。深く感謝申し上げます。

研究室のみならず、特に東京大学特任研究員 荒木美香さんには実験や解析について初歩的なことから、非常に熱心に御指導していただきました。打ち合わせでの鋭いご指摘には多くの刺激を受けました。深く感謝申し上げます。研究室の先輩や後輩の皆様とのふとした際の議論も多角的で新鮮であり刺激をうけました。忙しい中、積極的に実験の協力をしていただいた皆様の存在が、研究を進めていく上で大きな励みとなったことをここに記すとともに、深く感謝申し上げます。

また、本研究に対し多大なる寄付をしてくださった旭硝子株式会社 (AGC 旭硝子) さまには心より感謝申し上げます。特に大谷正紀さんには、研究当初から多くのご助言ご協力をいただきました。深甚の謝意を表します。

また、株式会社矢嶋の矢澤潤一社長をはじめとする皆様方には、建築部材としては極めて稀なスケールの鋼製骨組を非常に精度高く製作していただきました。本研究の展望についてもご助言をいただくなど、熱心なご協力をいただきましたことを心より感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に、多大な理解と協力をしてくれた父と母、また祖母と兄と弟に心より感謝いたします。

2017 年  
瀧本 信幸