

近畿大学工学部建築学科卒業研究概要

平成 14 年度		番号	99168137
指導教官	藤井 大地 助教授	氏名	吉富 健志
題名	ガラスの構造化に関する基礎的研究		

1. はじめに

ガラスは透明度が高く、低コストであるため建築材料として非常に魅力的である。またその軽快感により内外空間の連続性を積極的に表現した建物も数多く見られる。ガラスは何世紀にもわたって被覆用の素材として扱われてきたが、ここ数年、欧米ではガラスを階段や柱、壁などの構造化材として用いる試みがなされており、ガラスのみで構成される建物も造られている。

そこで本研究では、基礎的研究として、ガラスの材料特性およびガラス建築の現状を調査し、ガラスを柱、壁等の主要構造化材に用いた場合の基本特性を把握することを目的として、有限要素法にもとづく壁解析ソフトを開発し、解析によって我が国におけるガラス建築の実現の可能性を探る。

2. ガラスの材料特性¹⁾

板ガラスの強度は、主に表面に存在するごく微小なキズに支配されている。小さい応力しか生じさせない力でも、それら微小なキズの先端では応力集中により大きな応力となる。継続的に応力が作用するとそのキズは深く成長して大きな亀裂となり、ついに破壊に至る。このような破壊のメカニズムから、ガラスの割れは引張応力によって表面から発生し、小さな力でも通常のガラスは割れてしまう。

またガラス強度の特徴としてバラツキが非常に大きいこと、荷重速度や荷重時間、ガラスサイズによっても破壊強度が変化する。バラツキが非常に大きい理由は、ガラス表面に存在する微小なキズの大きさ・方向・分布が不規則なためである。荷重速度や荷重時間による強度の変化は一般的にガラスの疲労と呼ばれており、荷重速度が小さいほど、また荷重時間が長いほど強度は小さくなる。ガラスサイズによる強度変化は寸法効果と呼ばれるものであり、ガラスサイズが大きくなるほど強度は小さくなる(表 1)。これはガラスが大きくなると、相対的に微小なキズを含む確率が増すためである。そのためガラスの品種・板厚の他に、ガラス面積・縦横寸法・保存取り扱い状況・負荷される荷重の速度や時間等の要因により、ガラスの強度は変わる。

また、他の構造化材との強度比較を表 2 に示す。このように、ガラスの耐力は優れた圧縮強度を有しているが、反面、引張強度は弱く破壊は専ら引張応力に起因するとされている。例えば強化ガラスは、面外の曲げに対する引張応力度の低減を目的として開発されたものである。よって、ガラスを建築物に使用する場合には圧縮応力度が卓越する部位にガラスを適用し、またなるべくガラスに引張応力を発生させないことを原則とした設計をしなければならない。

表 1 板ガラスの平均破壊応力と許容応力値¹⁾

ガラス 品種	板厚	短期許容応力		長期許容応力	
		面内	エッジ	面内	エッジ
フロート 板ガラス	2, 3, 4, 5, 6, 8mm	24.5	17.7	9.8	6.9
	10mm	24.5	17.7	9.8	6.9
	12mm	19.6	17.7	7.8	6.9
	15mm	19.6	17.7	7.8	6.9
	19mm	19.6	17.7	7.8	6.9
強化 ガラス	5, 6, 8, 10, 12, 15mm	73.6	49.0	49.0	34.3

(N/mm^2)

表 2 他材料との強度比較²⁾

	ガラス	コンクリート	鋼	木材
ヤング率	7.16×10^4	2.06×10^4	2.06×10^5	$3.92 \sim 15.3 \times 10^3$
ポアソン比	0.23	0.167	0.3	
圧縮強度	392 ~ 490	12	402	24.5
引張強度	49 ~ 147	1.2	402	49

(N/mm^2)

3. ガラス建築の現状

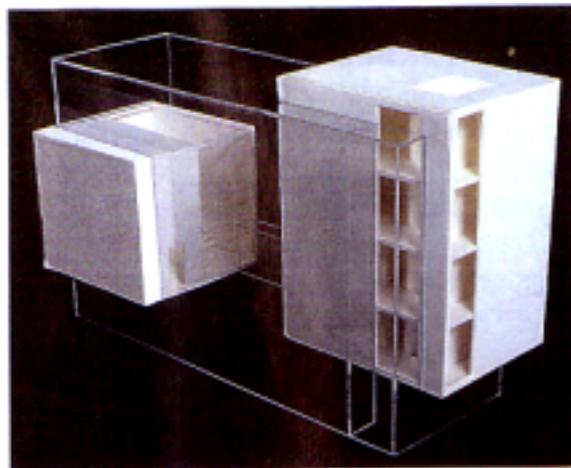
現在、ガラスの多くはカーテンウォールなどの二次部材として取り扱われている。しかし、ここ数年で構造化材として用いられるようになってきている³⁾。既往の研究でも MJG 工法⁴⁾⁵⁾と呼ばれる接合形態を用いたガラスパネルドームが中原などによって提案されている⁶⁾。この工法はガラスの滑り出しを許容しているため、面内せん断変形が生じた場合には、ガラスパネルには圧縮力のみが作用する。そのためこの工法はガラスの高い圧縮強度を積極的に利用するものである。また、

ガラスを用いた透明制震壁⁷⁾⁸⁾も提案されており、これはすでに実用可能な段階にあるといわれている。

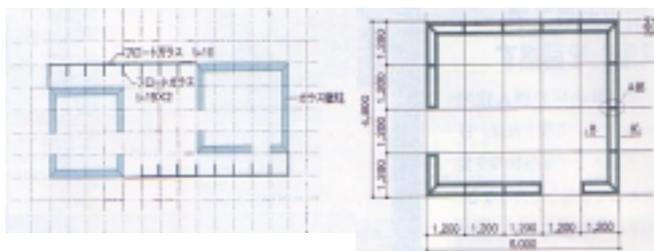
4. 構造ガラスを用いた建築⁹⁾

本研究では、構造ガラスを用いた建築として、日経アーキテクチャ・2002・2-18号・p77~p79に掲載された「Glass House (図-1)」に着目した。大阪市内に計画中の個人住宅「Glass House」は、実現すれば日本で初めてガラスを「建築物の主要な構造材」として使用した例となる。4層と2層の二つの直方体が、それぞれガラスで覆われた玄関ホールの上に載っている。上部の居室部分はS造だが、1階の玄関には鉄骨の柱がない。この部分はガラスの壁柱だけで力を負担するガラス構造である。

1階床スラブ(鉄骨+コンクリート)の下に免震層を設け、地震時の水平力を軽減する。スラブの上に立てるガラス壁柱は、2組の合わせガラス(計4枚)で力を受け、外側を耐火ガラスで覆う。耐火ガラスは「耐火被覆」の役割を果たし、力は負担しない。この耐火ガラスは断面中にケイ酸ソーダが多層に積み重なっており、火災時にはケイ酸ソーダが外側から順次発砲し結晶水が蒸気となって気化熱を吸収し続けるという遮熱性能を持った特殊なガラスを使用する。



模型写真



1階伏図

ガラス壁柱平面図

図-1 Glass House 概要

5. 有限要素法内解析法¹⁰⁾¹¹⁾

5.1 応力解析

板の面内変形理論では、3次元理論で定義された変位を次式のように2次元化する(図2)。

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) \\ w(x, y, z) &= w_0(z) \end{aligned} \tag{1}$$

ただし、 u_0, v_0 は板の面内の x, y 方向変位である。ここで、(1)式の左辺は、3次元物体の任意点 (x, y, z) の変位であるが、右辺では、これが x, y のみの関数になっている。ただし、(1)が成り立つためには、板の面内の変位が板厚方向に一定(z に無関係)である必要がある。

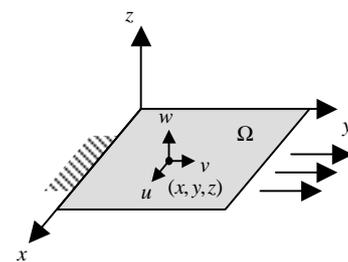


図2 面内変形理論における近似

板を分割する要素としては、図3に示す4節点要素を用いる。そして、要素内における(1)式の2次元化された変位 u_0, v_0 と回転角 θ_x, θ_y を、それぞれ次式の近似関数を用いて節点変位によって表す。

$$\begin{aligned} u_0(x, y) &= \mathbf{N}(\xi, \eta) \mathbf{u}^e & \mathbf{N} &= [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \\ v_0(x, y) &= \mathbf{N}(\xi, \eta) \mathbf{v}^e & \mathbf{u}^{eT} &= \{u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4\} \\ & & \mathbf{v}^{eT} &= \{v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4\} \end{aligned} \tag{2}$$

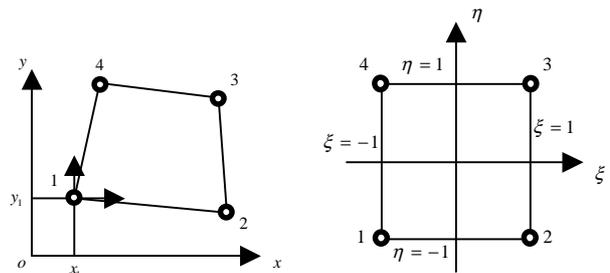


図3 4節点面内変形要素

ただし、形状関数 $N_i (i=1, \dots, 4)$ は、図3右に示す正規座標系 (ξ, η) の関数である。(2)式を歪みエネルギー式に代入すると、要素剛性マトリックスが得られる。

$$\mathbf{k}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} & \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \\ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \end{bmatrix} \mathbf{J} d\xi d\eta \tag{3}$$

ただし、

$$D_{11} = D_{22} = \frac{Et}{1-\nu^2}, \quad D_{12} = \frac{\nu Et}{1-\nu^2}, \quad D_{33} = \frac{Et}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

ここに、 t は板厚、 ν はポアソン比を表す。

なお、(3)式の \mathbf{J} はヤコビアンマトリックス、(3)式に対応する変位は $[u^{eT} \ v^{eT}]$ である。

(3)式の積分は、ガウスの 2 点積分を用いて行う。この場合、(3)式は、次のようになる。

$$\mathbf{k}^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \bar{\mathbf{k}}^e |\mathbf{J}| d\xi d\eta = \sum_{p=1}^2 \sum_{q=1}^2 \bar{\mathbf{k}}^e |\mathbf{J}| w_p w_q \quad (5)$$

(5)式の 2 点積分点と重みは

$$\xi_1 = \eta_1 = -0.57735026918963$$

$$\xi_2 = \eta_2 = 0.57735026918963$$

$$w_1 = w_2 = 1$$

である。

(5)式の要素剛性マトリックスを節点変位の連続性を考慮して重ね合わせて解くと、節点変位が得られ、また、板の要素内の応力は次式より得られる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \\ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} & \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^e \\ v^e \end{Bmatrix} \quad (6)$$

5.2 板の座屈解析

板の座屈は、歪み - 変位関係式が非線形（幾何学的非線形）になった場合に生じる現象である。非線形部分に関する仮想仕事式から、節点変位ベクトル \mathbf{w} に関して、次式の初期応力剛性マトリックスが導かれる。

$$\mathbf{k}_w^{(\sigma)^e} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial x} & \frac{\partial \mathbf{N}^T}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \end{bmatrix} |\mathbf{J}| d\xi d\eta \quad (7)$$

ただし、 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は、初期荷重が加わった場合の面内変形の応力を表す。板曲げ変形の線形剛性マトリックスを重ね合わせて全体剛性マトリックスを作成し、また、(7)式の初期応力マトリックスも自由度が対応するように重ね合わせて全体剛性マトリックスを作成すると、座屈問題の固有方程式が得られ、固有値問題の解法プログラムを適用することによって解くことができる。

6. ガラスの座屈に関する解析

6.1 解析モデル

解析モデルは「Glass House」を参考にし、1 層約 30 トン、高さ 3m の 2 層の直方体がガラスで覆われた 1 階部分の上に載っているものとする（図 - 4）。これを 1 枚あたりの厚さ

19mm のガラスを、1 枚のみ(19mm)、2 枚重ね(38mm)、3 枚重ね(57mm)、4 枚重ね(76mm)のガラス 16 枚、32 枚、48 枚、64 枚で支えるものとする。

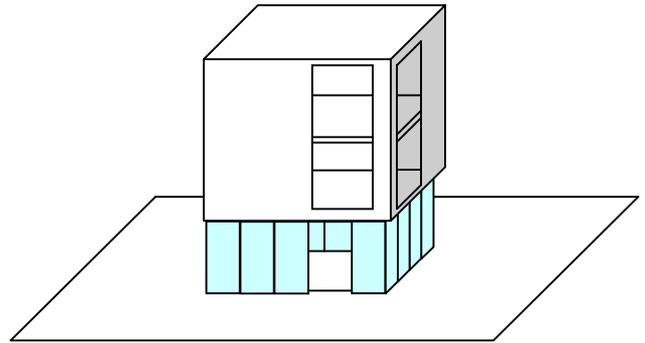


図 - 4 「Glass House」モデル図

表 - 3 ガラスモデル

ヤング係数	$7.16 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.23
平均破壊応力 (19mm)	(面内) 36.3 N/mm^2 (エッジ) 35.3 N/mm^2
長期許容応力 (19mm)	(面内) 7.8 N/mm^2 (エッジ) 6.9 N/mm^2
サイズ	$1200 \times 3000 \text{ mm}$

6.2 解析結果

板ガラスにおいて様々な境界条件について解析を実施したが、その内の 2 種類の解析結果を以下に示す。

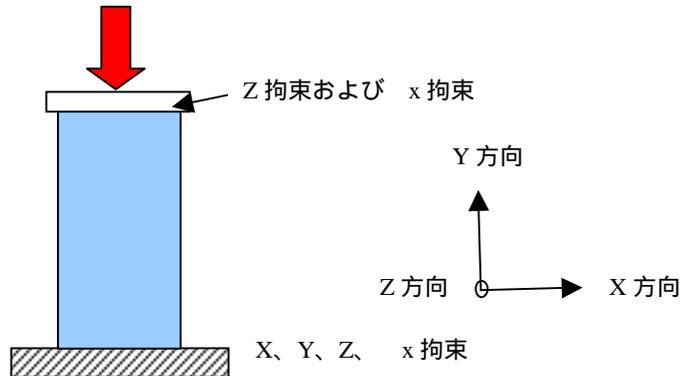


図 - 5 解析モデル A

解析モデル A (図 - 5) は、ガラスの下辺を X、Y、Z、 x について拘束し、上辺は Z 方向および x 方向を拘束した。

表 - 4 解析結果 A

板厚	1 枚 19mm	2 枚 38mm	3 枚 57mm	4 枚 76mm
荷重倍率	6.06	48.52	163.76	388.16
最大応力	2.32	1.16	0.77	0.58

(N/mm^2)

解析結果 A (表 - 4) において、荷重倍率は座屈荷重倍率であり、これが 1 以上であれば座屈に達しないことを表している。また、この結果からガラスは圧縮に対してかなりの耐力を有していることがわかる。

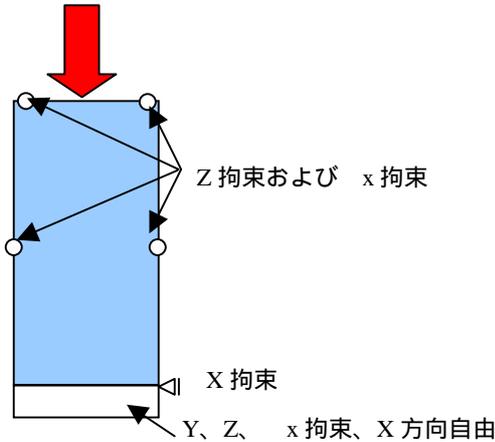


図 - 6 解析モデル B

解析モデル B (図 - 6) は、ガラスの下辺を Y、Z、x について拘束し、X 方向については自由とするが、ガラス板を留めておくために X 方向において 1 点だけ拘束する。ガラス板の上辺は両端を Z 拘束、および x 拘束とし、ガラス板の中間部を Z 拘束した。

表 - 5 解析結果 B

板厚	1 枚 19mm	2 枚 38mm	3 枚 57mm	4 枚 76mm
荷重倍率	11.43	91.45	308.66	731.63
最大応力	2.27	1.13	0.75	0.56

(N/mm^2)

解析結果 B (表 - 5) において、ガラス板の中間部を Z 拘束とすることで解析モデル A と比較して座屈荷重倍率が約 2 倍に増した。また、ガラス板の下辺の X 方向を自由とすることでガラス板の応力集中を回避することはできたが (図 - 7) 期待していたほど面内最大応力を低減することはできなかった。

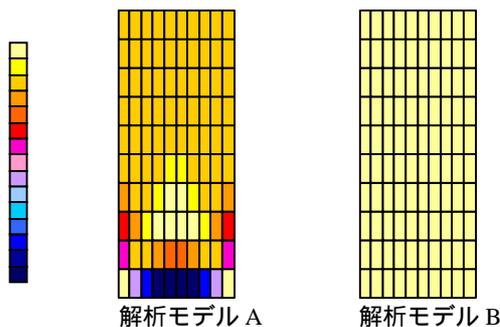


図 - 7 応力分布図

7. 結論および今後の展望

以上より、ガラスの材料特性、およびガラスの構造化に向けての研究や実験も積極的に行われていることが把握できた。また、前章で示したように、座屈に関しては、板厚を大きくすれば座屈荷重倍率も大きくなることを把握できたが、板厚を大きくすることでガラス本来の持っている透明性を維持できるかが懸念される。また、板厚を大きくすることで面内最大応力を下げることができるが、ガラスの材料特性として、ガラスのサイズが大きくなるほど強度が下がる傾向にあるため、板厚を大きくすればするほど長期許容応力が低下してしまう。そのため、どのようにして応力集中を起こさないようにするか、ガラスの接合形態の工夫が必要とされる。

今後の展望としては、今回実施した解析結果の整合性をとるための実験を行うことが必要とされる。また、ガラスは不意の衝撃で破損してしまう脆性材料である。したがって完全なガラス構造を目指すためには、ガラス部材の 1 つ 2 つが万一破損した場合でも、全体の構造が安定しているような設計が必要とされる。また、ガラスを床や踏み板に使用する場合には、事故的な破損も考えられる。また、その上に立つ者には視覚的な不安を感じることもあるだろう。このような点において今後検討する必要があると考えられる。しかし、ガラスを主要構造材として用いることは決して不可能ではなく、ガラスが建築における役割をさらに大きくしていくことは間違いないであろう。

参考文献

- 旭硝子株式会社 硝子・建材事業本部
旭硝子板ガラス建材総合カタログ 技術資料編 4-2-1 ~ 4-2-2、4-6-1 ~ 4-6-2
- 建築構造学 1 構造力学 () p96、p97 表-3.2 鹿島出版会
- GA 素材空間 02 p36、p37、p45、p56 A.D.A EDITA Tokyo
- フィグラ株式会社 ガラステック事業本部 製品カタログ MJG p4
- 日本建築学会構造系論文集、第 529 号、195 - 202、2000 年 3 月、斎藤公男、岡田章、今村柳輔、「挟み込み式ガラス点支持構法に関する研究」
- 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2000 年 9 月 20502、20503
- 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2000 年 9 月 21532
- 日本建築学会大会学術講演梗概集 2001 年 9 月
ガラスと粘弾性体を用いた透明制震壁の研究 (その 1 ~ その 7)
- 日経アーキテクチュア 2002・2-18 p77 ~ p79 日経 BP 社
- 有限要素法ハンドブック 基礎編、応用編 培風館
- チモシェンコ・ギア-弾性安定の理論 (下) 訳者、長谷節
ブレイン図書出版株式会社 丸善株式会社 p329 ~ p359