

## ガラス壁面に組み込まれたシーリング材の動的特性 DYNAMIC PROPERTIES OF SEALING MATERIAL IN GLASS WALLS

竹内 徹<sup>\*1</sup>, 田中 栄次<sup>\*2</sup>, 久田 隆司<sup>\*3</sup>, 片野 史大<sup>\*4</sup>

*Toru TAKEUCHI, Eiji TANAKA, Takashi HISADA  
and Fumihiko KATANO*

Recently large scales of glass wall structures have been constructed in urban complexes, as entrance halls or atrium walls, however, their dynamic characteristics under seismic vibrations are yet to be clarified. The sealing materials in-filled between the glass panels are considered to be the main factor for the stiffness and damping of such glass structures. In this paper, detailed dynamic experiments on the sealing material are carried out, and their dynamic characteristics under various frequencies, strains, and temperatures are verified. Also the own-period and damping ratios of detailed glass wall models are estimated by time-history analyses.

**Keywords :** *Glass Structure, Sealing, Dynamic properties, Stiffness, Damping*

ガラス構造, シーリング, 動的特性, 剛性, 減衰

### 1. 序

複合施設のエントランス部等に使用されるガラス構造物は近年大型化, サッシュレス化する傾向にあり, 高さ30mを超える支持枠のないガラス壁や自立する箱状のガラス構造物が数多く建設されるに至っている<sup>1)2)</sup>。これらは鋼製の骨組に直接支持されたガラス構造物であったり, リブ付ガラス壁が自立している等の構造形式を有している。設計に当たってこれらのガラス壁面は一般的に非構造物材として扱われ, 地震時に対する検討は主構造の応答に追従できるようにのみ行われることが多い。しかしながら, 大規模なガラス壁面の耐震設計においては, それ自身の振動応答を把握することも安全確認上不可欠となる。特に大型のガラス壁面が地震応答により損壊した場合, 非構造物材であってもこれが人的被害に与える影響は甚大となることが予想される。

壁面を構成するガラス板や支持鋼製架構に減衰性能は殆ど期待できず, 変形はガラスパネルの境界部で処理されるため, ガラス構造物の地震時の応答に大きな影響を与える剛性および減衰特性にはガラス間に打設されるシーリング材が大きな影響を与えることが予想される。しかしながらガラスシーリング材を構造物材として捉え, その動的応答下の剛性, 履歴特性および減衰特性を研究した事例は殆ど見られない。これは, 先述したようにシーリング材を含むガラス壁面が非構造物材として扱われ, 構造性能の面からの評価を受けて来なかったからである。しかしながら, ガラス構造物の応答解析を行

うにあたり, 従来の重層鋼構造物で使用されてきた設計用の減衰定数(例えば $\eta=2\%$ )をそのまま使用する根拠は無く, 正当な動的評価を行うための剛性, 減衰に関する情報が十分提供されているとはいえない。

ガラス間に打設されるシーリング材は, 製造メーカーにより, 単調せん断変形下における素材の剛性および限界変形量が示されている<sup>3)</sup>。また, ガラス壁面の耐震性能については, 菊地ら<sup>4)</sup>が縮小モデルにおける載荷実験を実施し, 耐力および復元力特性を確認している。一方, 山中, 和田ら<sup>5)6)</sup>は, ガラスパネル間に粘弾性体を設置し, ガラス壁面を制振部材として利用することを想定した動的実験および剛性・減衰性能の評価を行っている。これらを応用し, 粘弾性体付きガラス壁を伝統的木造架構の耐震性能向上に利用した事例も報告されている<sup>7)8)</sup>。しかしながら, 通常使用されるシーリング材の動的特性を調査し, 一般的なガラス構造物の減衰性能及び動的特性を評価した研究例は殆ど見られない。

そこで, 本研究ではガラス板の間に打設されるシーリング材に着目し, ガラス構造物の動的特性を把握することを目的とする。まず第一段階として, 最も一般的に使用されるシリコン系シーリング材について動的載荷実験を実施し, 各振動数・各振幅・各温度におけるせん断力-せん断変形関係および履歴特性の把握を行う。次にこれを再現する解析用履歴モデルおよび等価な線形減衰モデルを構築し, その動的特性を数値化する。更に簡単なガラス壁構造物例を想

<sup>\*1</sup> 東京工業大学建築学専攻 准教授・博士(工学)

<sup>\*2</sup> 東京工業大学建築学専攻 修士課程

<sup>\*3</sup> 日本板硝子(株)マネージャー 博士(工学)

<sup>\*4</sup> 日本板硝子(株) 工修

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.  
Graduate Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology  
Manager, Nihon Sheet Glass Co., Ltd., Dr. Eng.  
Nihon Sheet Glass Co., Ltd., M. Eng.

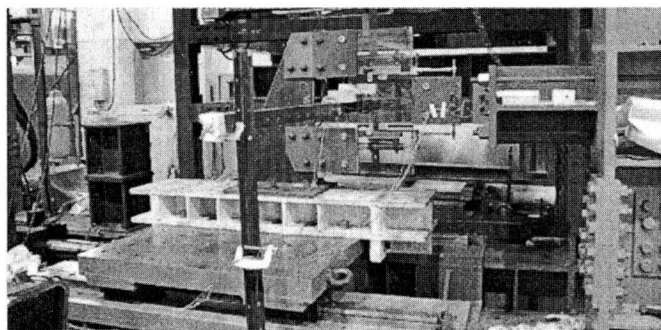


写真1 シーリング材動的載荷試験 セットアップ

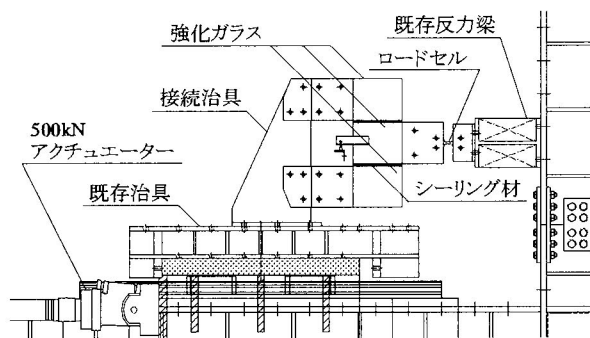


図1 シーリング材動的載荷試験 セットアップ図

定して各履歴モデルおよび各振動モデルを使用した場合の応答評価を行い、その動的特性を評価すると共に、履歴モデルによる応答評価値の差異について確認する。

## 2. ガラスシーリング材の動的載荷試験

シーリング材の動的特性を把握するため、図1及び写真1に示すようなガラス・シーリング材で構成された試験体について動的せん断載荷試験を行う。検討するシーリング材は、最も一般的に使用される高モジュラス・シリコン系シーリング SE960 厚 15(mm)、幅 15(mm)のものを使用する。試験は、静的載荷、動的漸増載荷、繰り返し載荷の3種類を行う。静的載荷は、シーリング材の静的力学特性及び破断強度等の確認を目的とし、速度 0.1(mm/sec)でせん断歪 50(%)ずつ加力する。動的特性の調査は動的漸増載荷によって行い、振動数一定の正弦波を用いて順次せん断歪振幅を増大させる。各歪振幅については、同振幅の加振を3サイクルずつ繰り返す。表1に示すように、振動数、振幅、温度をパラメータとして変化させ、各種依存性を検討する。加えて、シーリング材に振動が繰り返し作用したときの性状を把握するため、振幅一定の正弦波を用いた30サイクルの繰り返し載荷試験も行う。

各実験結果より、得られた履歴ループを図2(a)~(f)に示す。まず、図2(a)に示すように、静的載荷は同一試験体で2回に分けて行い、2回目に破断まで加力した。載荷1回目と2回目では性状が異なり、1回目加力時は線形であるのに対し、2回目は硬化型の曲線に変化する。尚、除荷時は常に非線形となる。これは、静的挙動においても一定の減衰効果を発揮し得ることを示唆している。また、破断時せん断歪は約 390(%)、破断時強度は 0.7(N/mm<sup>2</sup>)であり、脆性的な破断性状を示した。次に、図2(b)~(f)に示す振幅漸増及び繰り返しの動的載荷における履歴ループは振動数、温度変化に伴う形状変化があまり見られず、その一方で振幅には大きく影響を受けることがわかる。これらのシーリング材の履歴特性に見られる特徴を以下に述べる。

表1 シーリング材動的載荷試験 試験条件

| シーリング材 (2箇所)   |               |                | 試験内容       | 振動数<br>$f$ (Hz) | 温度<br>$\varphi$ (°C) | 歪振幅<br>$\gamma_a$ (%) |
|----------------|---------------|----------------|------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 厚さ<br>$t$ (mm) | 幅<br>$d$ (mm) | 長さ<br>$s$ (mm) |            |                 |                      |                       |
| 15             | 15            | 300            | 静的載荷       | —               | 25                   | 300,400               |
| 強化ガラス (3枚)     |               |                | 動的漸増<br>載荷 | 0.3             | 25                   | 30,50,100,<br>200,300 |
| 厚さ<br>(mm)     | 幅<br>(mm)     | 長さ<br>(mm)     |            | 1.0             | 35                   |                       |
|                |               |                |            |                 | 25                   |                       |
|                |               |                |            |                 | 15                   |                       |
| 15             | 250           | 450            |            | 3.0             | 25                   | 30,50,100,200         |
|                |               |                | 繰返し載荷      | 1.0             | 25                   | 100,200               |

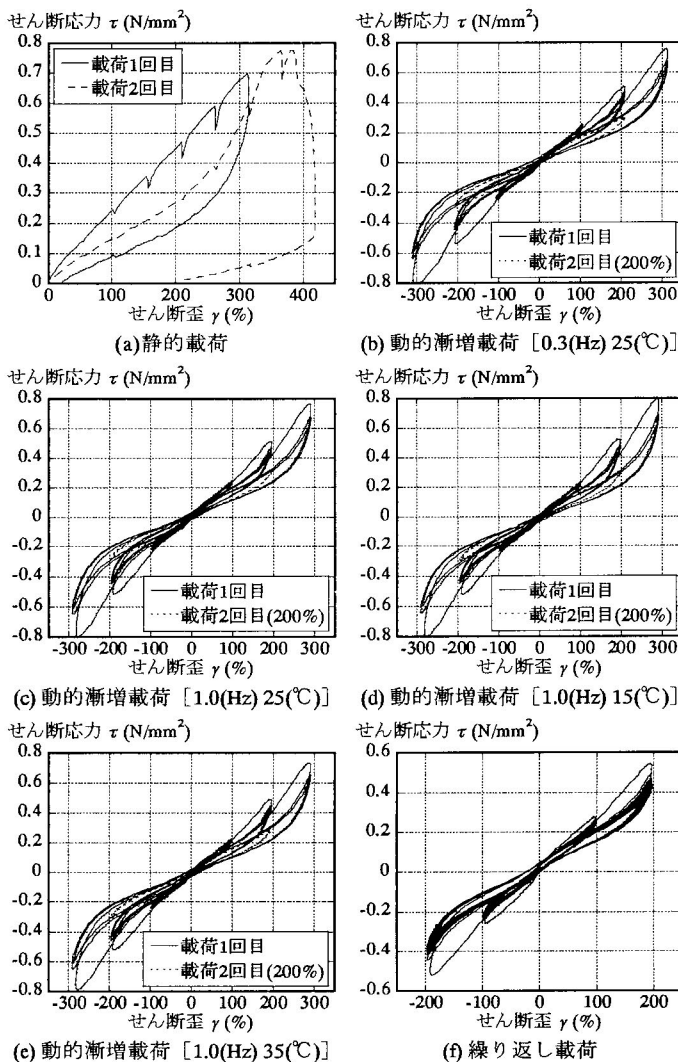


図2 実験結果 応力-歪関係

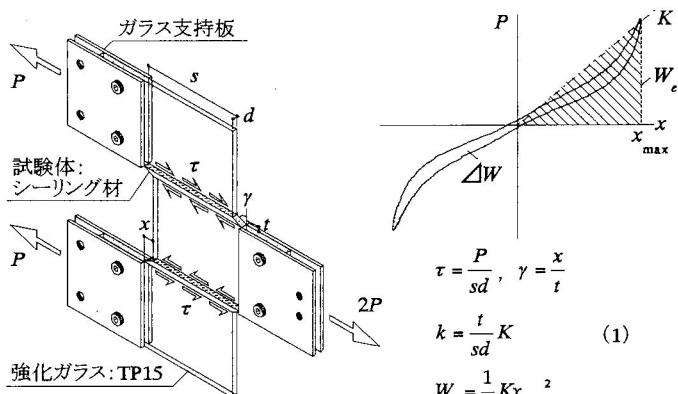


図3 等価せん断剛性  $k$ , 等価減衰定数  $h$  の算定

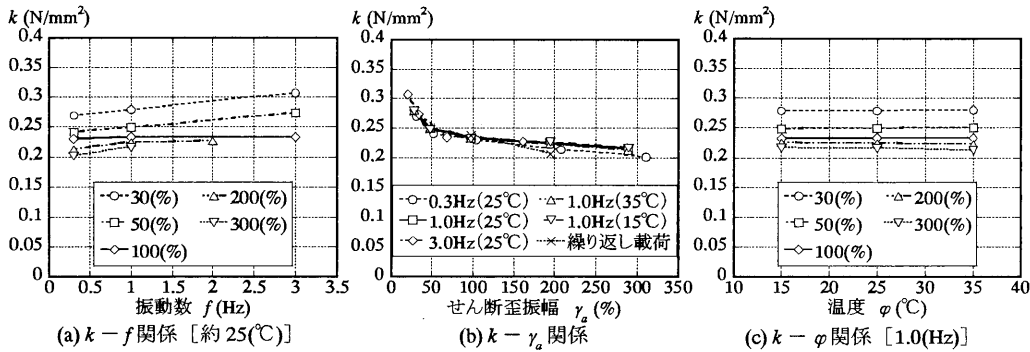


図 4 等価せん断剛性  $k$  の各依存性

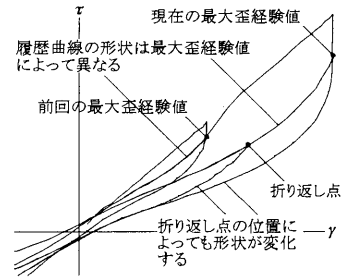


図 5 等価減衰定数  $h$  の各依存性

(a) 履歴則 i

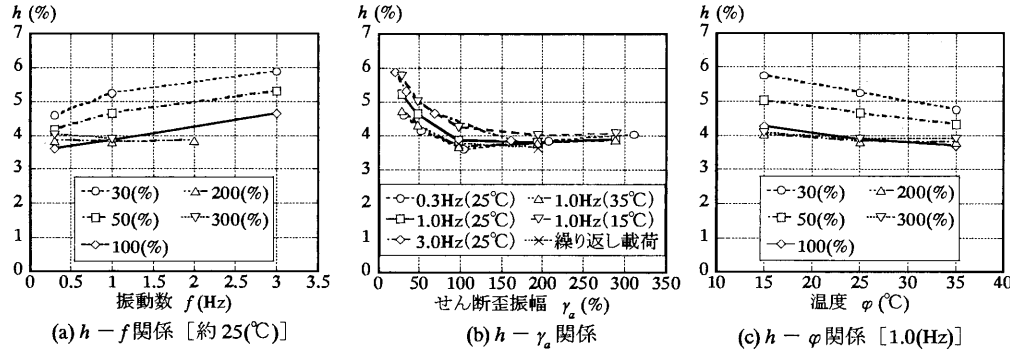
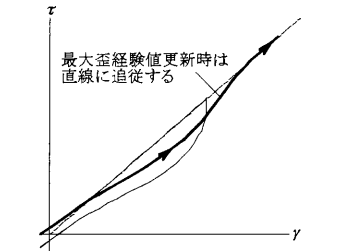


図 5 等価減衰定数  $h$  の各依存性



(b) 履歴則 ii

図 6 履歴型モデルの履歴特性

る。まず、各歪振幅での加振において、第1ループのみ高い剛性を示すが、第2ループ以降は硬化型の履歴曲線に形状が変化し、同時に最大耐力が低下する。さらに、各歪振幅における第1ループの最大変位点はほぼ同一直線状に位置し、加振振幅増大時に履歴曲線は原点を通る特定の直線に追従するような形状をとる。また、図2(f)より、第2ループ以降は繰返し加振によって徐々に耐力が低下するものの、ほぼ一定の性状を示す。ただし、100(%)以下の加振については第2ループ以降も耐力はほぼ低下せず、第1ループと同様の形状を保つ。次に、図2(b)~(e)で歪振幅300(%)加振前後における200(%)加振の履歴曲線を比較すると、300(%)加振後の200(%)履歴曲線は、300(%)加振前のものとは異なり、300(%)の履歴曲線に包絡されるような形状を示す。したがって、履歴曲線の形状はそのシーリング材が経験したせん断歪の最大値(以下歪最大経験値:  $\gamma_{\max}$ )に応じて不可逆的に変化すると考えられる。つまり、シーリング材の履歴特性は主に歪最大経験値によって決定されると推測される。

図2で得られた履歴曲線において、各ループにおける最大変位点と原点との割線剛性をシーリング材の等価せん断剛性  $k$  とする。また、図3に示すように各ループの囲う面積を試験体の吸収エネルギー  $\triangle W$  と見做し、 $k$  から求まる弾性歪エネルギー  $W_e$  で標準化することにより等価減衰定数  $h$  を算定する。

$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\triangle W}{W_e} \quad (2)$$

各歪振幅について、第1ループを除いた各ループの値を平均して得られた等価せん断剛性  $k$  及び等価減衰定数  $h$  を図4, 5(a)~(c)に示す。図4(a), 図5(a)を見ると、 $k$ ,  $h$  は振動数にあまり依存しないことがわかる。一方、図4(b), 図5(b)を見ると、振幅依存性は比較的大きく、歪振幅増大に伴い、 $k=0.2(\text{N/mm}^2)$ ,  $h=4(\%)$ 程度を下限值として収束する。また、図4(c), 図5(c)より、温度依存性はあまり見られない。以上より、シーリング材の動的特性は主に履歴特性、特

に歪最大経験値に依存すると考えられる。

### 3. シーリング材の動的特性のモデル化

#### 3.1 履歴型モデル

前章で得られた知見を基に、シーリング材の動的特性をモデル化する。前章より、シーリング材の動的特性は振動数、温度にほぼ依存せず、履歴特性に大きく影響を受けることがわかった。そこで、以上の履歴特性を非線形復元力特性としてモデル化した履歴アルゴリズムを作成し、動的特性を表現する。以降これを履歴型モデルと呼び、その履歴則の概要を以下に述べる。

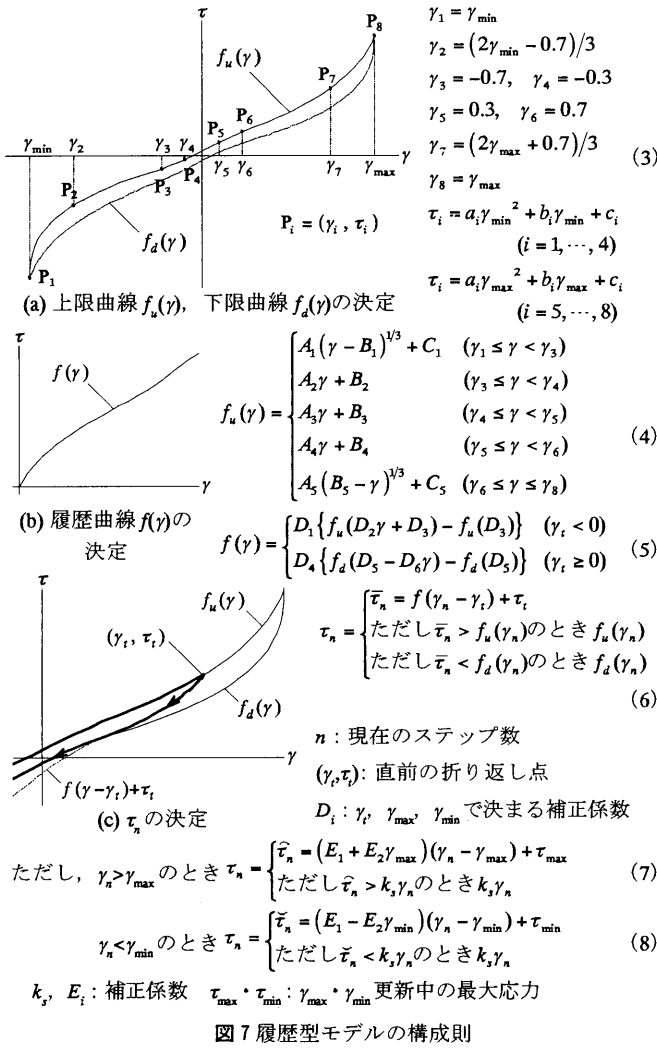
[履歴則 i] 履歴曲線の形状は折り返し地点の位置及び歪最大(最小)経験値によって決まる。

図6(a)に示すように、このモデルでは、加曲線・減曲線共に、歪最大経験値  $\gamma_{\max}$  によって形状を決定する。また、歪最大経験値が等しい場合でも、折り返し地点の位置によって形状を変化させる。負側の履歴曲線も正側と同様に定義し、シーリング材が経験したせん断歪の最小値  $\gamma_{\min}$  と折り返し地点の位置によって履歴曲線の形状を決定する。これは、パイリニア等の Masing 型モデルにおける骨格曲線が随時変化するようなものと捉えられる。

[履歴則 ii] 歪最大(最小)経験値更新時は剛性一定の直線に追従する。

履歴則 i の例外として、歪最大(最小)経験値更新時の加曲線は原点を通る直線に追従するものとする。つまり、傾き一定の直線をたどるか、それに近づく形をとる。尚、負側についても同様であり、正負共に追従する直線の傾きは不変とする。ただし、歪最大(最小)経験値  $\pm 100(\%)$  以下の範囲においては実験結果に合わせて剛性を変化させる。この場合、履歴則 i より決定されるせん断応力が履歴則 ii で決まる値より大きければ、後者の履歴曲線に従う。

履歴曲線の形状を歪最大経験値、折り返し地点の位置からどのよ



うに決定するかの形状決定則は、各歪振幅における履歴曲線形状の実験値を、歪最大経験値の関数として最小自乗法により近似することで構築する。以下その手法を具体的に述べる (図 7)。まず、実験結果を用いて、最小自乗法により図 7 中式 (3) の未知係数  $a_i \sim c_i$  を決定する。次に、式 (3) が示す各点を通るように式 (4) の未知係数  $A_i \sim C_i$  を求め、これを  $\gamma_{\max} \cdot \gamma_{\min}$  における履歴ループの上限曲線  $f_u(\gamma)$  とする。また、同様の手順を点対称に行って下限曲線  $f_d(\gamma)$  も求める。履歴曲線  $f(\gamma)$  はこれらを用いて式 (5) で表す。通常はこの  $f(\gamma)$  を Masing 型の骨格曲線と同様にして扱い、せん断応力  $\tau_n$  を式 (6) より  $\bar{\tau}_n$  と定める。ただし、決定された  $\bar{\tau}_n$  が  $f_u(\gamma)$  及び  $f_d(\gamma)$  で囲まれる領域の外にある場合、 $f_u(\gamma)$  または  $f_d(\gamma)$  上の点  $f_u(\gamma_n)$  及び  $f_d(\gamma_n)$  に補正する (図 7(c))。また式 (7), (8) に示すように、 $\gamma_n > \gamma_{\max}$  または  $\gamma_n < \gamma_{\min}$  の場合は履歴側 ii に基づき直線に追従する。

作成した履歴型モデルの荷重-変位関係を実験値と比較し図 8(a) に、等価せん断剛性  $k$  及び等価減衰定数  $h$  の比較を図 8(c), (d) に黒印で示す。これらの結果より、履歴型モデルは実験結果をほぼ再現できていることがわかる。

### 3.2 粘弾性型モデル

前述の履歴型モデルは、実験結果におけるシーリング材の復元力特性を正確に表現しようとするものであるが、非線形非 Masing 型の複雑なモデルとなっている。これに対し、設計上は計算がより簡便

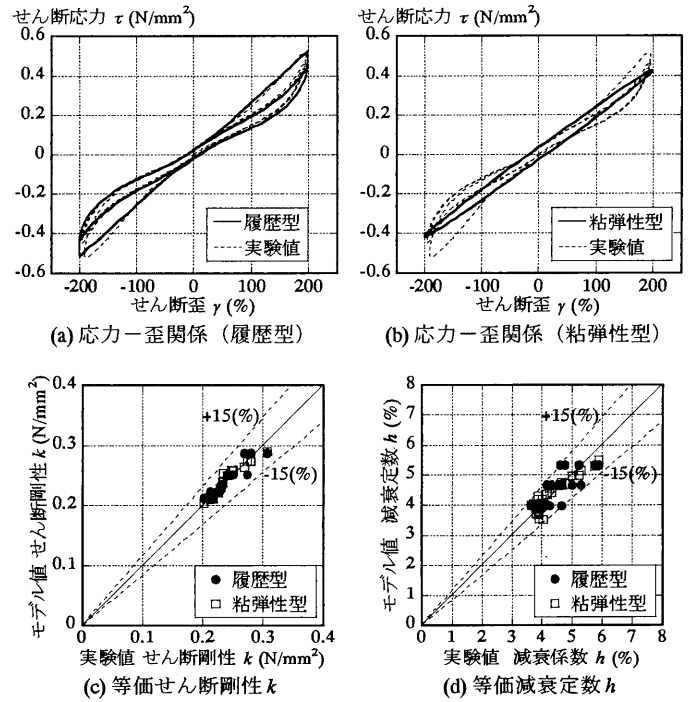


図 8 モデル値と実験値との比較

なモデルでの復元力特性の近似が望まれる。そこで、シーリング材を実験結果と等価剛性及び減衰性能を有する線形粘弾性体としてモデル化することを考える。せん断剛性  $k$ , 減衰係数  $c$  及び減衰定数  $h$  を、黄らの研究<sup>9)</sup>と同様の振動数, 振幅, 温度をパラメータとしたモデル式を用い次式で表現する。

$$k = a_0 f^{a_1} \gamma_a^{a_2} e^{a_3 \varphi} \quad (9)$$

$$c = b_0 f^{b_1} \gamma_a^{b_2} e^{b_3 \varphi} \quad (10)$$

$$h = d_0 f^{d_1} \gamma_a^{d_2} e^{d_3 \varphi} \quad (11)$$

ここで、 $f$ : 振動数,  $\gamma_a$ : 歪振幅,  $\varphi$ : 温度である。前章の実験結果から未知係数を同定すると次式が得られる。

$$k = 0.238 f^{0.021} \gamma_a^{-0.11} e^{-0.00017 \varphi} \quad (12)$$

$$c = 3.76 \cdot 10^{-3} f^{-0.93} \gamma_a^{-0.23} e^{-0.0061 \varphi} \quad (13)$$

$$h = 0.0496 f^{0.049} \gamma_a^{-0.12} e^{-0.0059 \varphi} \quad (14)$$

式 (12) ~ (14) で得られる荷重-変位関係を実験結果と比較したものを図 8(b) に、等価せん断剛性  $k$  及び等価減衰定数  $h$  の比較を図 8(c), (d) に白印で示す。これらの結果より、粘弾性型モデルは、履歴曲線の形状には対応できないものの、 $k, h$  の値はある程度近似できることが認められる。以降は履歴型モデルが真値を示すと見做し、粘弾性型モデルを履歴型モデルと比較することでモデルによる差異を確認しながら、具体的なガラス壁の動的特性評価を行う。

## 4. 1 自由度せん断系モデルによる応答比較

### 4.1 解析モデルの設定

前章で設定したシーリング材の動的特性モデルを基に、具体的なガラス壁面モデルの応答解析を行うことで、ガラス壁面の耐震性能を検証するとともに、構築した動的特性モデルを比較検討する。検討モデルとして吹き抜けや大型のキャノピー等で用いられる建物第 1 層に設けられたカーテンウォールを想定し、図 9 のガラス壁面モデルを解析対象として設定し、その面内方向振動について検討する。ガラス壁面モデルは面ガラス、リブガラス、サッシ、それらを接続

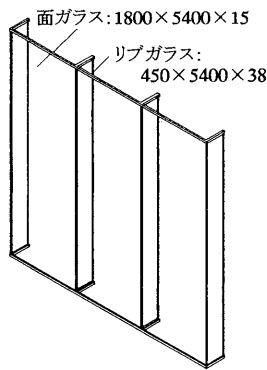


図9 検討用ガラス壁面モデル

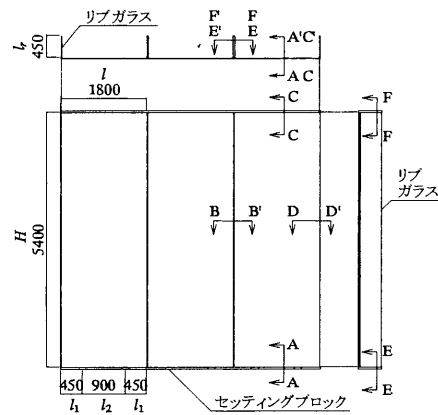
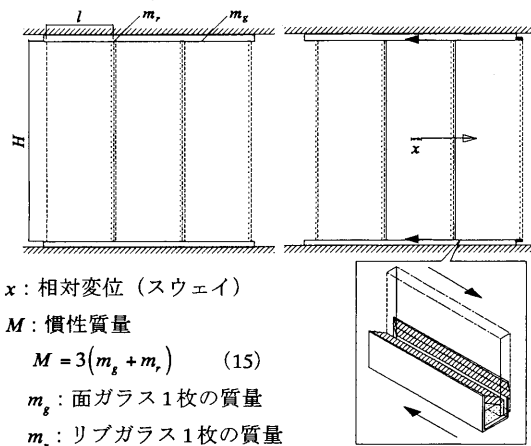


図10 ガラス壁面接合部寸法



[スウェイ変形概念図]

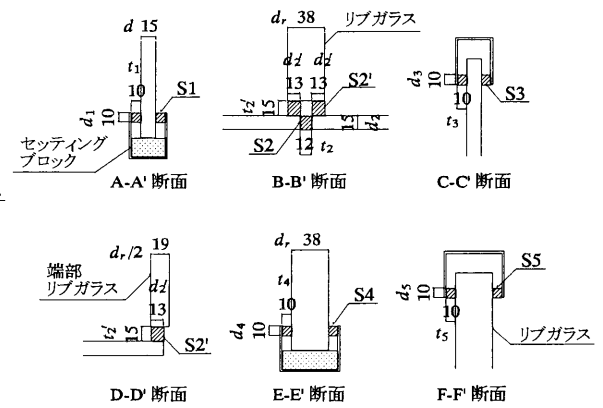
図11 1自由度系モデルの概要

するシーリング材、及びガラスの自重を支持するためにガラス下部に設置するセッティングブロックからなり、面ガラス3枚分でガラス構面を構成している。ただし、両端のリップガラスのみ他の半分の厚さとする。想定するガラス壁面接合部の詳細を図10に示す。図10中に示す通り、以降の記述ではガラス壁各部のシーリング材をS1～S5と呼称する。また、解析上ガラス及びセッティングブロックは全て剛体と見做し、加振方向はガラス構面方向のみとする。尚、シーリング材のせん断履歴は前章で構築したモデルを用いるが、引張・圧縮剛性は線形とし、減衰は考慮しない。セッティングブロックーガラス間の摩擦等は無視する。

まず、簡単な振動形態として、図11に示すようにガラス壁の上下端サッシ部が固定されている場合を考える。これは、ガラス壁が組み込まれている上下の主架構が剛体であり、ガラス自身の振動のみが生じるモデルである。さらに、ガラス上下端のシーリング接合部S1, S3, S4, S5の仕様が同じ場合、ガラスはロッキング変形せずスウェイのみの振動モードとなる。以上のモデルは1自由度せん断系と捉えることができ、同モデルについて前述の履歴型、粘弾性型の復元力特性を組み込んだ各種の解析モデルを設定する。

#### (a) 履歴型1自由度系モデル：HF1

まず図11 枠内(a)のように、スウェイのみの1自由度系モデルに履歴型の復元力特性を用いたものを履歴型1自由度系モデル（以下HF1）と呼称する。履歴型の非線形復元力特性から求まる各シーリング材S1～S5のせん断剛性を各々 $k_1 \sim k_5$ とおき、シーリング材の圧縮・引張剛性は、文献3)を参考に、せん断剛性における実験値の



(a) 相対変位 最大応答比較

(b) 絶対加速度 最大応答比較

図12 相対変位 $x$  最大応答比較

低減を考慮し、各々 $k_p = 1.40(\text{N/mm}^2)$ 、 $k_t = 0.66(\text{N/mm}^2)$ とする。このとき、HF1の等価剛性 $K$ は、図10の寸法を用いて次式で与えられる。

$$K = 3 \left\{ 2 \frac{ld_1}{t_1} k_1 + 2 \frac{ld_3}{t_3} k_3 + l \left( \frac{d_4}{t_4} + \frac{d_5}{t_5} \right) (k_p + k_t) \right\} \quad (16)$$

ただし、 $k_1$ 、 $k_3$ は非線形であるため、微小時間 $\Delta t$ での局所剛性を逐次算出して非線形時刻歴応答解析を行う。つまり、逐次積分の1ステップ毎に局所剛性を算出し、増分運動方程式を構築する。各ステップの相対変位 $x$ の値から

$$\gamma_1 = \frac{x}{t_1}, \quad \gamma_3 = \frac{x}{t_3} \quad (17)$$

よりS1, S3のせん断歪を毎ステップで算出すれば、S1, S3各々の局所剛性 $\tilde{k}_1$ 、 $\tilde{k}_3$ を求めることができる。これにより各シーリング材の局所剛性をそれぞれ求めた上で、式(16)を用いてモデルの局所剛性 $\tilde{K}$ を決定し、応答を求める。

#### (b) 粘弾性型1自由度系モデル：VF1

図11 枠内(b)より、弾性ばねとダッシュポットを組み合わせたモ

表2 入力地震波

| 地震波          | 最大加速度<br>( $\text{m/s}^2$ ) | 最大速度<br>( $\text{m/s}$ ) | 標準化最大<br>加速度 ( $\text{m/s}^2$ ) |
|--------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| BCJ-L2(前半部)  | 3.557                       | 0.574                    | 3.098                           |
| El-centro NS | 3.417                       | 0.335                    | 5.106                           |
| JMA-Kobe NS  | 8.206                       | 0.907                    | 4.522                           |
| Taft EW      | 1.759                       | 0.177                    | 4.969                           |

表3 1自由度系モデル 固有値

| 固有<br>振動数<br>$f$ (Hz) | 減衰定数<br>$h$ (%) | 質量<br>$M$ (kg) | 剛性<br>$K$<br>( $\text{kN/mm}$ ) | 減衰係数<br>$C$<br>( $\text{kN/m}\cdot\text{s}$ ) |
|-----------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| 13.52                 | 3.84            | 1786           | 12.88                           | 11.67                                         |

※ VF1の固有振動数は入力地震波によって異なるため、表3ではその平均値を示す。後述の表4も同様。

$x$ : 重心変位  $\delta$ : スウェイ  
 $\theta$ : 回転変位 (ロッキング)

$$x = \delta + H_0 \theta \quad (19)$$

$x_{top}$ : 頂点変位

$$x_{top} = \delta + H \theta \quad (20)$$

$M$ : 慣性質量

$$M = 3(m_g + m_r) \quad (21)$$

$m_g$ : 面ガラス1枚の質量

$m_r$ : リブガラス1枚の質量

$$J$$
: 回転中心の慣性モーメント  $J = 3(J_g + J_r) \quad (22)$

$J_g$ : 面ガラス1枚の慣性モーメント

$J_r$ : リブガラス1枚の慣性モーメント

$$J_g = m_g \left( \frac{l^2 + H^2}{3} + l_1^2 - l_1 l \right), \quad J_r = m_r \left( \frac{d_r^2}{12} + \frac{H^2}{3} \right) \quad (23)$$

$$Q$$
: 水平荷重  $Q = M(\ddot{x} + \ddot{y}) \quad (24)$

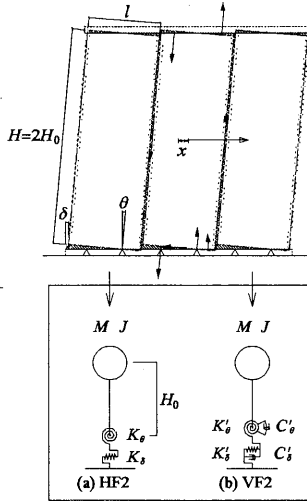
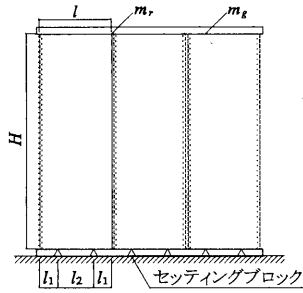


図13 2自由度系モデルの概要

表4 2自由度系モデル固有値

|                | 1次                       | 2次                        |
|----------------|--------------------------|---------------------------|
| 固有振動数 $f$ (Hz) | 4.63                     | 19.59                     |
| 固有モード          | $x$                      | 0.80                      |
|                | $H_0 \theta$             | 0.60                      |
| 刺激係数 $\beta$   | 1.03                     | 0.64                      |
| 減衰定数 $h'$ (%)  | 4.88                     | 14.45                     |
| $M$ (kg)       | $K_\delta$ (kN/mm)       | $C_\delta$ (kN/m·s)       |
| 1786           | 5.86                     | 11.57                     |
| $J/H_0^2$ (kg) | $K_\theta/H_0^2$ (kN/mm) | $C_\theta/H_0^2$ (kN/m·s) |
| 2452           | 2.60                     | 9.70                      |

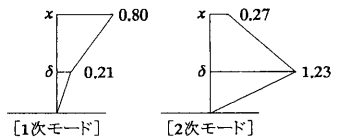


図14 固有モード図

デルを粘弾性型1自由度系モデル (以下VF1) と呼ぶ。等価剛性  $K$  は式 (16) の  $k_1, k_3$  に式 (12) で定まる値を用い, 等価減衰係数  $C$  は次式の  $c_1, c_3$  に式 (13) で定まる値を代入して得られる。

$$C = 6l \left( \frac{d_1}{l_1} c_1 + \frac{d_3}{l_3} c_3 \right) \quad (18)$$

尚, 式 (12), (13) において,  $\varphi$  は 25(°C) で一定とし,  $f, \gamma_{ai}$  は適当な初期値を与えた上で, 解析結果の値が収束するまで反復計算を行う。VF1 は HF1 と異なり等価線形モデルであるため, 上記の方法で応答スペクトルを用いた応答評価も可能となる。

#### 4.2 時刻歴応答解析による応答比較

解析には, 表2に示す地震波4種類を最大速度 0.5(m/s) で規準化したものを用いる。ただし, BCJ-L2 は継続時間の前半 60(s) のみを抜き出して用いる。各モデルの応答比較を図12(a), (b) に, VF1 の固有値解析結果を表3に示す。図12より, 履歴型モデルと粘弾性型モデルによる解析結果は, およそ  $\pm 15$ (%) 以内の精度で対応している。表3より, VF1 の等価減衰定数はおよそ 4(%) であることがわかる。

### 5. ロッキングを含む2自由度系モデルによる応答評価

#### 5.1 解析モデルの設定

次に, 同じガラス壁について, 上部が自由端となったロッキング変形を考慮したモデルを設定し, 同様の検討を行う。このとき, 図13に示すように, ガラス壁はロッキング変形とスウェイ変形を有する2自由度系モデルと捉えることができる。

##### (a) 履歴型2自由度系モデル: HF2

図13(a)のように, 履歴型の復元力特性を有する2自由度系モデルを履歴型2自由度系モデル (以下HF2) と呼称する。履歴型の復元力特性から定まる各シーリング材 S1 ~ S5 のせん断剛性を各々  $k_1 \sim k_5$  とし, シーリング材の圧縮・引張剛性は, 前章同様  $k_p, k_t$  とする。また, S1, S3 のロッキングによる捩れ変形は無視する。このとき, HF2 のスウェイに対する剛性  $K_\delta$  及びロッキングに対する回転剛性  $K_\theta$  は次式で表せる。

$$K_\delta = 3 \left\{ 2k_1 \frac{ld_1}{l_1} + (k_p + k_t) \frac{ld_4}{l_4} \right\} \quad (25)$$

$$K_\theta = \left( 2k_2 \frac{d_2}{t_2} + 3k_3 \frac{d_3}{t_3} \right) (l + t_2) Hl \quad (26)$$

HF2 を運動方程式で表すと, 図13中の各式を用いて次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & J - MH_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_\delta & -K_\delta H_0 \\ -K_\delta H_0 & K_\theta + K_\delta H_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} M\ddot{y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

ここで,  $\ddot{y}$  は地動加速度である。前章と同様に, 微小時間  $\Delta t$  での局所剛性を逐次算出して  $k_1, k_2, k_3$  を求め, 非線形時刻歴応答解析を行う。

##### (b) 粘弾性型2自由度系モデル: VF2

図13(b)に示す弾性ばねとダッシュポットを組み合わせたモデルを粘弾性型2自由度系モデル (以下VF2) と呼ぶ。前章同様各シーリング材のせん断剛性・減衰係数を  $k_i \cdot c_i$  と置くと, スウェイ及びロッキングに対する剛性  $K_\delta, K_\theta$  は式 (25), (26) で, 減衰  $C_\delta, C_\theta$  は次式で与えられる。

$$C_\delta = 3 \left( 2c_1 \frac{ld_1}{l_1} \right) \quad (28)$$

$$C_\theta = \left( 2c_2 \frac{d_2}{t_2} + 3c_3 \frac{d_3}{t_3} \right) (l + t_2) Hl \quad (29)$$

以上より, 運動方程式は次式で表せる。

$$\begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & J - MH_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K'_\delta & -K'_\delta H_0 \\ -K'_\delta H_0 & K'_\theta + K'_\delta H_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C'_\delta & -C'_\delta H_0 \\ -C'_\delta H_0 & C'_\theta + C'_\delta H_0^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} M\ddot{y} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

VF2 は HF2 と異なり等価線形モデルのため, 時刻歴応答解析だけでなく反復計算を行うことで固有値解析やSRSS等の応答スペクトルを用いた簡易応答評価も可能となる。

#### 5.2 時刻歴応答解析による応答比較

解析には, 前章と同じ地震波を用いる。図15 ~ 16 に各モデルの応答比較, 図17に各モデルの荷重-変位関係を示す。また, VF2 の固有値解析結果を表4及び図14に示す。ただし, 表4では各モードを次式で分解し示している。

$$\begin{Bmatrix} x(t) \\ H_0 \theta(t) \end{Bmatrix} = \beta^{(i)} \{u\}^{(i)} q_0^{(i)}(t) + \beta^{(2)} \{u\}^{(2)} q_0^{(2)}(t) \quad (31)$$

ここで,  $\beta^{(i)}$ :  $i$  次刺激係数,  $\{u\}^{(i)}$ :  $i$  次固有ベクトル,  $q_0^{(i)}(t)$ :  $i$  次モード基本解,  $\omega^{(i)}$ :  $i$  次固有円振動数である。また,

$$h^{(i)} = \frac{C^{(i)}}{2\omega^{(i)} M^{(i)}} \quad (32)$$

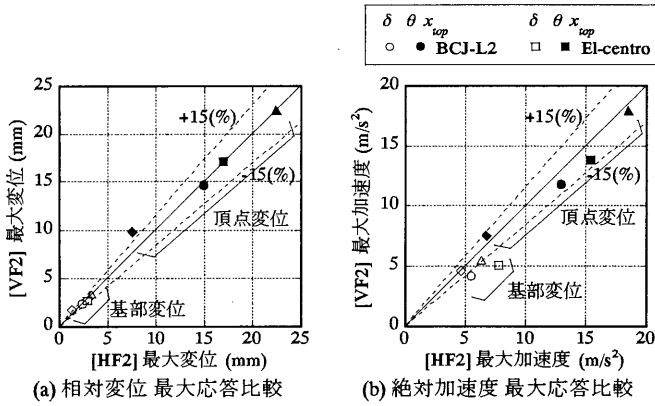


図 15 基部水平変位  $\delta$ ・頂点水平変位  $x_{top}$  応答比較 [ $V_{max}=0.5m/s$ ]

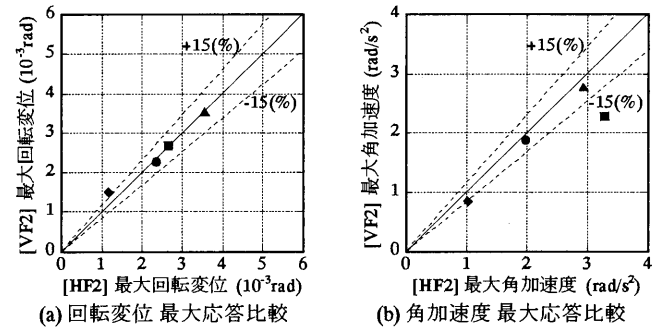


図 16 ロッキング変形角  $\theta$  応答比較 [ $V_{max}=0.5m/s$ ]

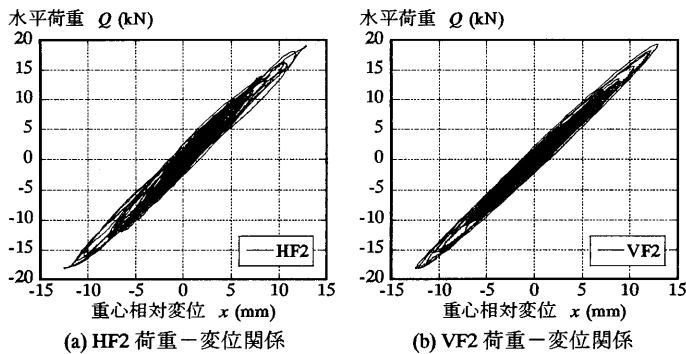


図 17 各モデル 荷重-変位関係 [Taft EW,  $V_{max}=0.5m/s$ ]

$$M^{(i)} = \begin{Bmatrix} u^{(i)} \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 0 \\ J \\ H_0^2 - M \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (33)$$

$$C^{(i)} = \begin{Bmatrix} u^{(i)} \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} C'_\delta & -C'_\delta \\ -C'_\delta & C'_\delta + C'_\delta \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

より等価減衰定数  $h^{(i)}$  を算定している。図 15～16 より、各モデルとも地震波毎に同様の傾向を示し、加速度応答ではややずれが見られるものの、変位応答は概ね同程度で評価できることが分かる。したがって、ガラス壁の応答評価を行うにあたって、等価線形粘弾性モデル VF2 は簡易モデルとして成立しうると考えられる。また表 4 より、今回指定したモデルに対して VF2 の等価減衰定数は 1 次で 5(%) 程度であり、シーリング材がガラス壁に対し、ある程度の減衰性能を付与することがわかる。

前述の解析結果は変位応答が総じて小さく、シーリング材の最大せん断歪は 60(%) 以内に収まっている。そこで、より大きな入力を与えることでシーリング材を大変形させ、履歴の非線形性が各モデルによる応答評価に及ぼす影響を考察する。入力地震波は表 2 の地

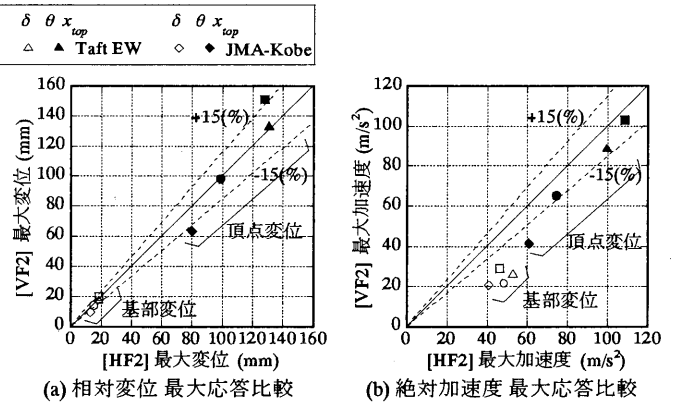


図 18 基部水平変位  $\delta$ ・頂点水平変位  $x_{top}$  応答比較 [ $V_{max}=2.5m/s$ ]

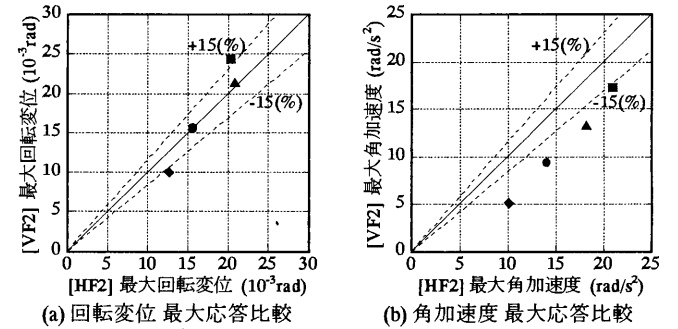


図 19 ロッキング変形角  $\theta$  応答比較 [ $V_{max}=2.5m/s$ ]

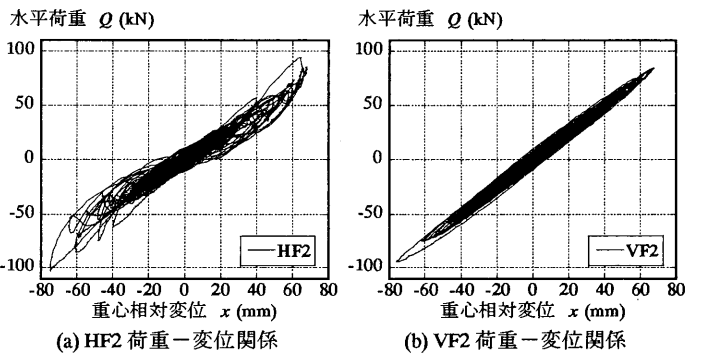


図 20 各モデル 荷重-変位関係 [Taft EW,  $V_{max}=2.5m/s$ ]

震波を最大速度 2.5(m/s) で規準化したものを用いる。このとき、シーリング材は最大で 300(%) 以上変形する。図 18～19 に各モデルの最大応答比較、図 20 に各モデルの荷重-変位関係を示す。図 18～19 より、変位応答に関してはモデルの違いは概ね  $\pm 15(%)$  以下の誤差に収まっており、シーリング材が大変形する場合でも、等価線形粘弾性モデル VF2 はある程度の適合性を有している。一方、応答加速度評価に関しては粘弾性型モデルは履歴型モデルに比べて 15(%) 以上小さく、その最大値を小さく見積もる傾向がある。以上より、シーリング材のせん断変形が 100(%) を越えるような大変形領域において、粘弾性型モデルは最大応答変位に対しては妥当な値を与えるが、加速度応答を正確に評価する上ではシーリング材の荷重-変位関係を正確にモデル化した履歴モデルを用いることが望ましいと考えられる。

## 6. 結

本研究では、ガラス・シーリング材で構成された試験体について動的載荷試験を行い、シーリング材の動的特性を等価せん断剛性お

よび等価減衰定数で表現した。また、得られた特性からシーリング材の復元力特性を履歴型モデルとして設定し、同時に設計用簡易モデルとして前述の等価減衰を有する粘弾性型モデルを提案した。さらに、これらの復元力特性モデルを用いて、ガラス壁モデルの動的特性を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) シリコン系シーリング材の動的特性は振動数、温度にあまり依存せず、振幅、履歴特性に大きく影響を受ける。履歴特性はシーリング材が経験したせん断歪の最大値によって不可逆的に変化する。また、等価せん断剛性 $k$ は $0.2 \sim 0.31(\text{N/mm}^2)$ 程度、これに対する等価減衰定数 $h$ は $3.5 \sim 6.0(\%)$ 程度となる。
- (2) ガラス壁面を想定した解析モデルの応答評価に関しては、せん断変形のみを考慮した1自由度系モデル、スウェイ・ロックン変形を考慮した2自由度系モデル共に、各履歴モデルの変位応答は概ね等しく、等価剛性、等価減衰を同定した等価線形粘弾性型モデルでも設計用簡易モデルとして、応答評価には有効であることを確認した。ただし、せん断変形が $100(\%)$ を越える大変形下での加速度応答を評価する場合には精密な履歴型モデルを用いることが望ましい。尚今回設定したガラス壁面モデルにおいて、1自由度系モデルの等価減衰は $4(\%)$ 程度、2自由度系モデルの等価減衰定数は1次で $5(\%)$ 程度と評価される。

今回の研究は打設直後のシーリング材及びガラス壁面の面内振動特性について試験・分析を行ったが、経年劣化による特性の変化や、ガラス壁面の面外振動についても今後検討をする必要があると考えられる。今後、ガラス壁としての減衰性能については、壁パネルとしての振動実験、測定等を行うことにより、検証を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 寺本隆幸, 北村春幸, 原田公明, 竹内徹: D.P.G. 構法を用いたガラスキューブの設計と施工, 日本建築学会技術報告集, No.3, pp.84-89, 1996.2
- 2) 透明なデザインと建築技術, 建築技術, No.550, pp.48-135, 1996
- 3) 東レ・ダウコーニング・シリコン株式会社: SE960 シーラント 技術資料 No.E539
- 4) 菊地哲, 佐藤明憲, 和久井智他: ガラススクリーン工法の性能に関する研究, その1・2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.95-98, 1998.9
- 5) 山中真之, 田中真夫, 和久井智, 和田章: ガラスと粘弾性体を用いた透明制振壁の研究, その1~5, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.849-858, 2001.9
- 6) 奥田浩文, 勝俣英雄, 山中真之, 大熊潔, 所健: ガラス制振壁の実用化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.511-512, 2006.9
- 7) 陶器浩一, 源田孝司, 北村義也: ガラス制振壁を用いた伝統木造建物の耐震改修, 日本建築学会技術報告集, No.24, pp.119-123, 2006.12
- 8) 竹内徹, 今富陽子, 播繁, 三浦史朗, 安井昇, 三原良樹, 久田隆司, 安藤浩一: 移動式ガラス制振壁の実験的研究, 日本建築学会技術報告集, No.25, pp.159-164, 2007.6
- 9) 黄一華, 加藤啓史, 和田章, 岩田衛, 竹内徹, 大熊潔: 振動数と温度に依存する粘弾性ダンパーの動的力学モデル, 日本建築学会構造系論文集第516号, pp.91-98, 1992.2

(2007年9月4日原稿受理, 2007年11月28日採用決定)