

振動台実験によるガラス制振壁の制振性能確認とガラス安全性確認

奥田 浩文 勝俣 英雄
 山中 昌之
 (本社設計本部)

Shaking Table Test on Control Performance and Safety of Clear Damping Wall with Glass and Viscoelastic Material

Hirofumi Okuda Hideo Katsumata
 Masayuki Yamanaka

Abstract

The Clear Damping Wall is an epoch-making vibration control system consisting of a transparent glass wall and a viscoelastic material. It is effective in both architectural and structural design, because glass walls make the structure visually attractive and the viscoelastic material dissipates vibration energy under a wide variety range of external loads from strong winds to large earthquakes. The authors have developed methods for evaluating the vibration control performance of the Clear Damping Wall from experimental results of both static and dynamic loading tests. However, some more specific details need to be studied before they can be put into practical use. One is consistency between responses derived from dynamic loading tests and those due to seismic loads and another is confirmation of safety against out-of-plane loads. This paper describes experimental studies using a shaking table to more clearly evaluate the vibration control performance and to confirm the system's safety. The results have led to development of easy-handling and high-accuracy evaluation methods that consider the aspect ratio of the glass and the placement of the viscoelastic materials.

概要

透明なガラスとエネルギー吸収能力の高い粘弾性体とを組み合わせたガラス制振壁は、視覚的に美しく透明性の高いガラスを用いることによる意匠上のメリットと、地震や強風時に建物の揺れのエネルギーを吸収するダンパーとしての機能(耐震性および居住性の向上)との双方を兼ね備えた制振システムである。これまで実大モデルを用いた静的および動的載荷実験などを行い、限られた範囲での制振性能評価手法は確立してきた。しかし、ガラス制振壁の実用化に際しては、動的載荷実験に基づくこの従来評価法では地震応答との整合性に不十分な場合があること、面外力に対するガラスの安全性が未確認であることなど、解決すべき課題を有している。本報では、ガラスのプロポーション、粘弾性体の貼付位置などの違いに応じた簡便且つ高精度の性能評価手法を確立することを目的として、振動台実験によりガラス制振壁の制振性能と安全性を確認する実験を実施したので、その結果について報告する。

1. はじめに

透明なガラスとエネルギー吸収能力の高い粘弾性体とを組み合わせた「ガラス制振壁」(Fig.1参照)は、視覚的に美しく透明性の高いガラスを用いることによる意匠上のメリットと、地震や強風時に建物の揺れのエネルギーを吸収するダンパーとしての機能(耐震性および居住性の向上)との双方を兼ね備えた制振システムである。

ガラスは透明であり、多くの建築家が建物の意匠性を高める素材として採用しているが、脆性材料ということから、従来は構造材料として利用されなかった。従来技術では耐震要素としてブレース、耐震壁を配するため、空間に閉鎖感、重苦しさがあり、魅力に欠ける空間となりがちであった。しかし、耐震要素としてブレース、耐震壁を配しない場合には、特に鉄骨造では剛性不足のため建物が揺れやすく、居住性の悪化などが懸念されること

になる。

本技術は、従来、構造材料として利用されなかったガラスを制振システムに組み込み、構造体として利用しよ

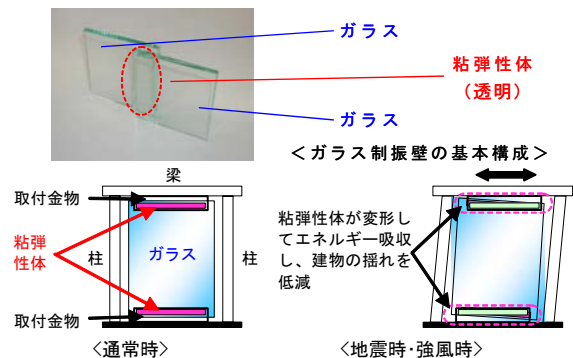


Fig.1 ガラス制振壁の概要
 Outline of Clear Damping Wall
 with Glass and Viscoelastic Material

うとする点に革新性がある。ガラスと粘弾性体とを組み合わせた制振システムを構築することにより、ガラスに加わる力を低減することが可能となる。すなわち、ガラスの安全性を担保し、制振性能を確保しながら、ガラスの有する高い意匠性(透明性)を利用できる点が、本制振システムの大きな特長である。本技術でも壁を構成するために空間は区切られることになるが、ガラスを利用していることから視界が連続するため、空間に開放感を与えることが可能となる。このような意匠性と耐震性とを両立した構造システムは、従来存在しなかった。

これまで実大モデルを用いた静的および動的載荷実験などを行い、限られた範囲での制振性能評価手法¹⁾は確立してきた。しかし、ガラス制振壁の実用化に際しては、動的載荷実験に基づく現状の評価手法では地震応答との整合性に不十分な場合があること、面外方向力に対するガラスの安全性が未確認であることなど、解決すべき課題を有している。

本報では、ガラスのプロポーシオン、粘弾性体の貼付位置などの違いに応じた簡便且つ高精度の性能評価手法を確立することを目的として、振動台を用いて実施した制振性能把握実験とガラス安全性確認実験の、それぞれの結果について報告する。

2. 振動台実験の概要

2.1 実験パターン

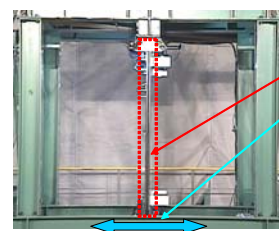
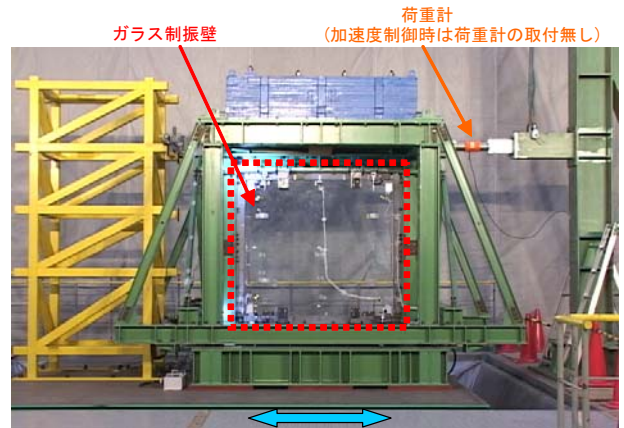
一連の実験は、制振性能の把握を目的とした振動台加力実験と、ガラス安全性の確認を目的としたそれとに大別される。前者はガラス制振壁の面内方向加力(慣性力による加力および動的載荷による加力)を基本とし、ガラスの形状や粘弾性体の貼付位置、加力振動数などを実験パラメータとして、後者は加力方法(動的載荷・静的載荷)の違いや加力方向(面外方向・45度方向)などを実験パラメータとしてそれぞれ実施した。

振動台実験時の状況写真例をFig. 2に示す。(a)が面内方向加力時の、(b)が面外方向加力時の実験状況をそれぞれ表している。各写真共、赤破線部がガラス制振壁部である。なお、面外方向加力実験時の振動台加力方向は、面内方向加力実験時と同方向とし、ガラス制振壁自体を90度回転させて実施した。

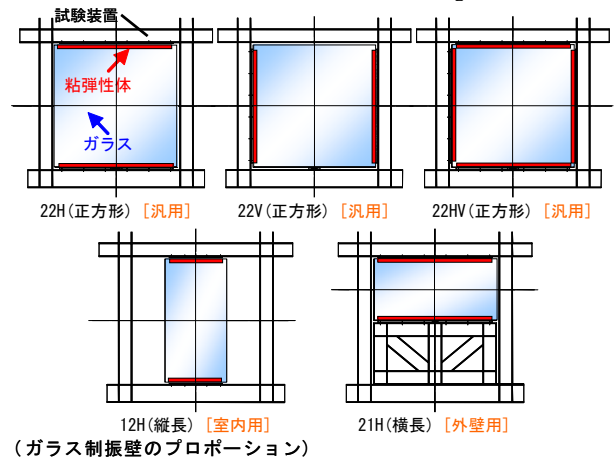
実験パターン(ガラス制振壁のプロポーシオンの違い)をFig. 3に一括して示す。ガラスの形状は、外壁用を意図した横長タイプ、室内用を意図した縦長タイプ、および汎用性を意図した正方形タイプとした。また、粘弾性体の貼付位置は、横長タイプおよび縦長タイプの場合はガラスの上下端部のみとし、正方形タイプの場合はガラスの左右端部のみ、上下端部のみ、および4方向(左右端部+上下端部)の3タイプとした。本報では、特に22H(正方形)の場合の結果について報告する。

2.2 計測項目

Fig. 3に示す実験パターンのうち、22H(正方形)の場合



(a) 面内方向加力
(b) 面外方向加力
Fig. 2 振動台実験状況
Situation of Shaking Table Test



ガラス制振壁のプロポーシオン	ガラス (縦×横, 厚)	粘弾性体 (幅×成, 厚)
12H (縦長)	1,800× 900, t12	780× 50, t12
21H (横長)	900× 1,800, t12	1,680× 50, t12
22H, 22V, 22HV (正方形)	1,800× 1,800, t12	1,800× 50, t12

Fig. 3 実験パターン
Type of Clear Damping Wall with Glass and Viscoelastic Material

の計測機器の設置位置(ガラス制振壁廻り)をFig. 4に示す。図中、●印が加速度計を、■印がレーザー変位計を、▲印が歪ゲージを、★印が熱電対をそれぞれ表している。レーザー変位計によって試験装置に対するガラスの相対変位が、熱電対によって粘弾性体自体の温度がそれぞれ計測される。なお、X方向およびZ方向がガラス制振壁・面内方向(X方向:水平方向,Z方向:上下方向)を、Y方向がガラス制振壁・面外方向をそれぞれ表す。

3. 振動台実験結果の比較

3.1 解析モデル

既往の性能評価手法¹⁾を応用し、解析モデルにおける

粘弾性体(ガラス制振壁)の負担力は、以下の式(Fig. 5参照)を用いて算定した。

$$P = Kx + C(dx/dt) \quad (1)$$

$$K = k\{I_x I_y / (I_x + I_y)\} \times (1/H^2) \quad (2)$$

$$C = c\{I_x I_y / (I_x + I_y)\} \times (1/H^2) \quad (3)$$

$$x = x_{\max} \times \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$dx/dt = 2\pi f \times x_{\max} \times \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$k = 83.99 \times f^{0.30} \times \gamma_{\max}^{-0.24} \times e^{-0.073\theta} \quad (6)$$

$$c = 21.36 \times f^{-0.53} \times \gamma_{\max}^{-0.0089} \times e^{-0.10\theta} \quad (7)$$

ここで、

- P : ガラス制振壁(粘弾性体)の負担力 (N)
- K : ガラス制振壁(粘弾性体)の剛性 (N/cm)
- C : ガラス制振壁(粘弾性体)の減衰係数 (N・s/cm)
- H : ガラスの高さ=加力高さ (cm)
- V : ガラスの幅 (cm)
- x : ガラス制振壁の層間変位 (cm)
- dx/dt : ガラス制振壁の層間速度 (cm/s)
- x_{\max} : ガラス制振壁の最大層間変位 (cm)
- ωt : 位相 (rad)
- f : 正弦波振動数 (Hz)
- k : 粘弾性体のせん断剛性 (N/cm²)
- c : 粘弾性体の減衰係数 (N・s/cm²)
- θ : 粘弾性体の温度 (°C)
- t_0 : 粘弾性体の厚さ (cm)
- γ_{\max} : 粘弾性体の最大せん断歪

ガラス制振壁の回転中心はガラス中央と仮定し、 I_x, I_y は下式により求めることとした。

$$I_x = (I_{xh} \times 2 + I_{xv} \times 2) / t_0, \quad I_y = (I_{yh} \times 2 + I_{yv} \times 2) / t_0$$

ここで、

$$I_{xh} = (a \cdot b^3 / 12) + (a \cdot b \times ys^2), \quad I_{xv} = (b \cdot d^3 / 12),$$

$$I_{yh} = (b \cdot a^3 / 12), \quad I_{yv} = (d \cdot b^3 / 12) + (d \cdot b \times xs^2),$$

$$xs = (V - b) / 2, \quad ys = (H - b) / 2$$

なお、式(6)、(7)の k, c を求める際の粘弾性体・最大せん断歪(γ_{\max})は、式(8)に示す通り、

$$\gamma_{\max} = \frac{2}{3} \times \frac{\sqrt{(a/2)^2 \cdot I_x^2 + (d/2)^2 \cdot I_y^2}}{I_x + I_y} \times \frac{x_{\max}}{H} \times \frac{1}{t_0} \quad (8)$$

粘弾性体・最外縁変位の2/3倍と仮定し決定した。

3.2 制振性能確認実験結果

制振性能把握を目的とした面内方向加力実験結果の一例をFig. 6に示す。図中、(a)は慣性力による加力(実験パターン:22H)の場合の、(b)は動的載荷による加力(実験パターン:22H)の場合の結果をそれぞれ表す。振動台の加力方向は1方向のみ(Fig. 2(a)中、矢印方向)である。図中、(a)慣性力加力は、Fig. 2(a)に示す荷重計を取り外した状態で実施した。なお、本実験における振動台の加力波形は正弦波とし、加力振動数は8層鉄骨造建物を想定し0.75Hzに設定している。(粘弾性体の振動数依存性は既に把握していることから、本実験では実験パラメータを減らすため、加力振動数を0.75Hzに固定して実施)

Fig. 6の(a-1)、(b-1)は相対的に小振幅レベル(層間変形

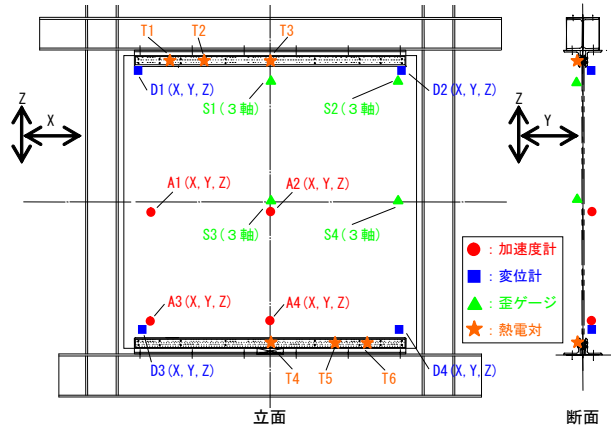


Fig. 4 計測機器設置位置(ガラス制振壁廻り) - 22Hの場合 -
Position of Various Sensors (Surrounding of Clear Damping Wall with Glass and Viscoelastic Material)

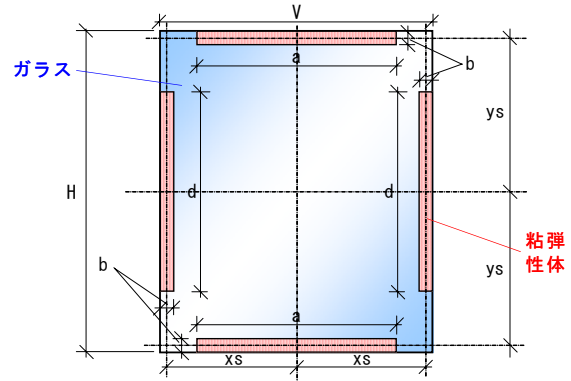


Fig. 5 解析モデルの概要
Outline of Analytical Model

角1/180~1/90程度)時の、同図(a-2)、(b-2)は相対的に大振幅レベル(層間変形角1/40~1/30程度)時の、ガラス制振壁の負担力と変位の関係をそれぞれ表している。各図には、3.1節で示す手法で求めた粘弾性体(ガラス制振壁)の負担力-変位関係の解析結果を赤破線で併記した。解析時の粘弾性体温度には、(a)慣性力加力時は全加力時間中の平均温度を、(b)動的載荷加力時は加力開始時の温度をそれぞれ用いている。併せてFig. 6には、当該実験時のガラス変位の時刻歴波形も示している。

これらの結果から、ガラス制振壁は振幅レベルによらず、安定した履歴特性を有していることが確認できる。また、加力方法ごと(慣性力による加力および動的載荷による加力)に粘弾性体温度を適宜評価することで、解析結果は実験結果を良く近似することを確認した。併せて、ガラス制振壁の回転中心は、概ねガラスの重心位置近傍にあることも確認した。

3.3 ガラス安全性確認実験結果

ガラス安全性の確認を目的とした面外方向加力実験(動的載荷による加力、実験パターン:22H)時の加力状況をFig. 7に、ガラスに作用した応力と変位の関係をFig. 8にそれぞれ示す。振動台の加力波形は制振性能把握実験時

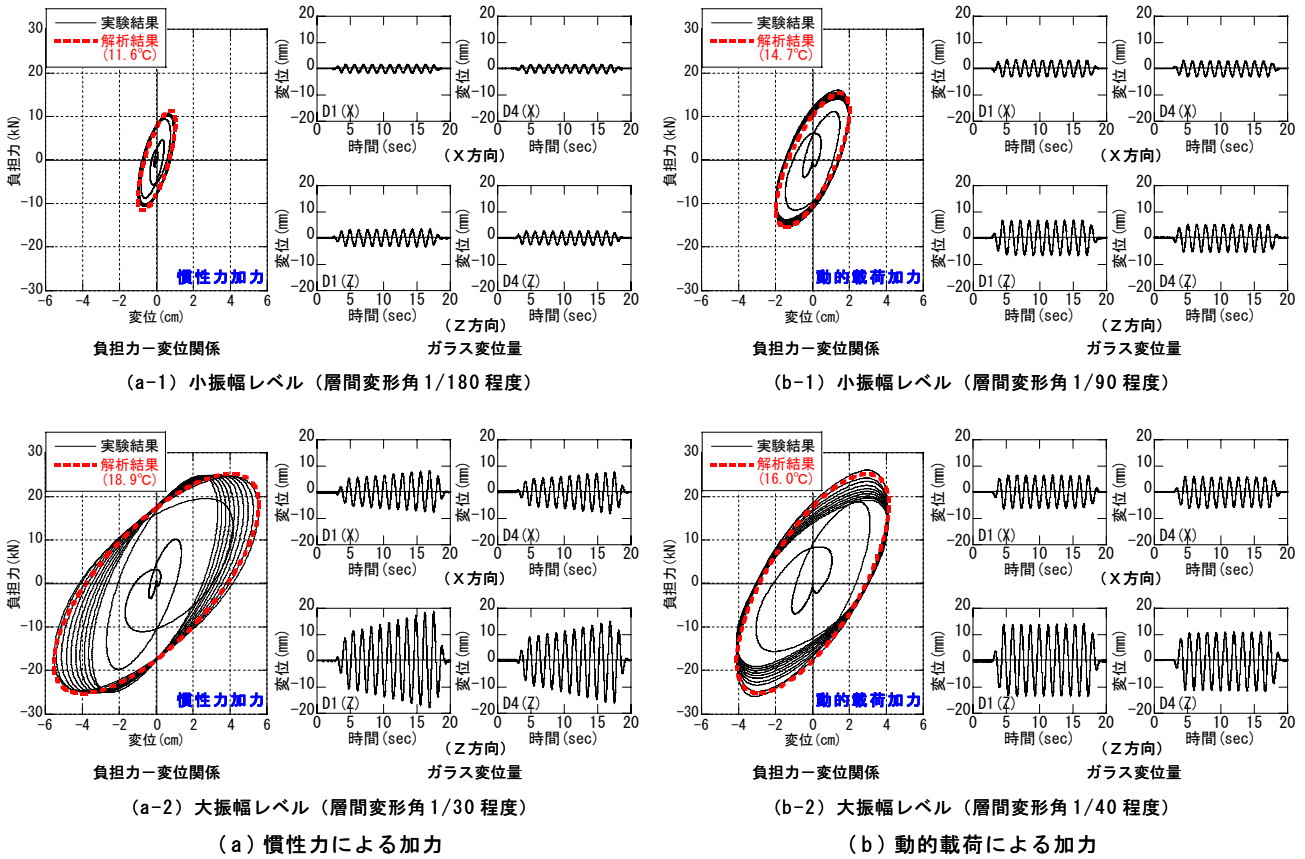


Fig.6 制振性能確認実験結果 (面内加力)
Result of Control Performance Experiment (In-Plane Load)

と同様に正弦波とし、その際の加力振動数は0.75Hzとした。なお、本実験時の加力最大変位(振動台最大変位)は10.5cmとした。

ガラス安全性確認実験結果から、層間変形角(ガラス高さに対する加力最大変位)が1/17程度で、且つガラス端部にガラス面内短期許容応力の2倍程度の力を作用させた場合でも、粘弾性体が軸方向に変形することなどによって、ガラス破損は発生しないことを確認した。

4. まとめ

振動台実験によって、ガラス制振壁の制振性能と安全性に関する検証を実施した。これらの結果から、構築したモデルによる解析結果と実験結果とは概ね近似していること、およびガラス面内短期許容応力の2倍程度の力が作用した場合(層間変形角≒1/17)でもガラスに破損は生じないことを確認した。

謝辞

本研究は、国土交通省 平成17年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業費補助金の交付(国住生第114-24号)を受けて、住友スリーエム株式会社 大熊 潔氏、所 健氏らと共に実施したものです。また、実験の実施に際しては、旭硝子ビル建材エンジニアリング株式会社 石田 光



Fig.7 加力状況
Loading Situation
(面外加力)
(Out-of-Plane Load)

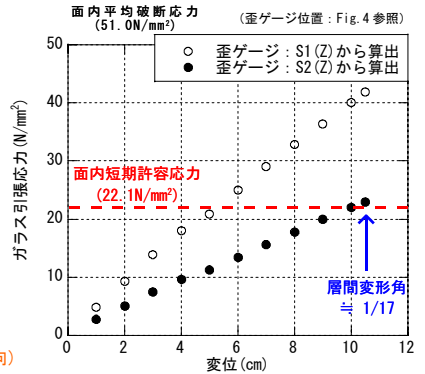


Fig.8 ガラス安全性確認実験結果
Result of Safety of Glass
(面外加力)
(Out-of-Plane Load)

氏に多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 岡本, 他: ガラスと粘弾性体を用いた透明制振壁(その7 伝統的木造建築物を対象とした実大性能実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 371 ~ 372, (2002)