ガラス壁面の面内動的特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON IN-PLANE DAYNAMIC CHARACTERISTICS OF GLASS WALL

竹内 徹^{*1}, 田中 栄次^{*2}, 久田 隆司^{*3}
Toru TAKEUCHI, Eiji TANAKA and Takashi HISADA

Seismic responses of large glass walls are deeply affected by the dynamic properties of their sealing materials. However, their dynamic characteristics have been not confirmed because of their being treated as non-structural elements. The authors have studied on the dynamic properties of glass sealing material with dynamic experiments, and proposed their precise hysteretic models in the previous paper. In this study, dynamic shaking-table tests on glass wall mock-ups are carried out, and their in-plane dynamic characteristics and seismic response are confirmed. Their results are compared with analyses using proposed hysteretic models, and their validities are discussed.

Keywords : Glass Wall, Sealing, Dynamic properties, Damping, Shaking Table Test

ガラス壁, シーリング, 動的特性, 減衰, 振動台実験

1. 序

複合施設のエントランス部等に使用されるガラス壁面は近年大型化, 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多く建設されるに至っている¹⁾²⁾. これらはリブ付のガラス自身が自立する構造形式や, 鋼製骨組に支持されたガラス壁面となっているが, 一般的な構造設計においてはこれらの壁面は非構造物として扱われ, 地震時における設計は主構造の応答に追従できるように配慮されているのみであることが多い. しかし大規模なガラス壁面では, それ自身の振動応答により破壊に至る可能性もあり, その動的特性を把握することは安全確認上不可欠と思われる. 大型のガラス壁面が損壊した場合, 非構造物であってもこれが人的被害に与える影響は甚大となる可能性がある.

ガラス構造物の地震時の応答に大きな影響を与える減衰特性や剛性は, その多くがガラス間に打設されるシーリング材で決定されることが予想される. しかし, ガラスシーリング材を構造物として捉え, 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や, シーリング材を構造要素と見なしてガラス壁面の動的特性を論じた研究は殆ど見られない. 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現在まで非構造物として扱われ, 構造性能の面からの評価を受けてこなかったからと考えられる.

そこで, 前論文 3)ではガラス板の間に打設されるシーリング材に

着目し, 最も汎用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とともに, 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した. また, 簡単なガラス壁構造物例を想定して上記履歴モデルを使用した場合の応答評価を行い, その動的特性の評価を試みた. 本論文では, 前論文を受けて実際にシーリング材を含む代表的な形式のサッシュレスガラス壁面の縮小模型を製作し, 振動台実験を実施することにより面内方向の動力学特性を把握する. さらに, 前論文で提案したシーリング材の履歴モデルおよび等価粘性減衰モデルを用いた地震応答解析を実施し, 実験結果と比較することでその整合性を確認する.

2. 自立型ガラス壁の振動特性

2.1. 自立型ガラス壁の振動実験

まず, ガラス壁単体の地震時挙動を調査するために自立型ガラス壁の振動実験を行う. 試験体は図 1~3 に示す 3 種類を用意する. SR1 は高さ 5.4m の縦リブを有するガラス壁の縮小モデルであり, NR1 は SR1 からリブガラスを排し単純化した試験体, NR2 は NR1 をさらに単純化した試験体である. シーリング材には共通して最も一般的な高モジュラス・シリコン系シーリング SE960 を使用する. NR2 の NR1

^{*1} 東京工業大学建築学専攻 教授・博士(工学)

^{*2} 東京工業大学建築学専攻 修士課程(当時)

^{*3} 日本板硝子(株) マネージャー・博士(工学)

Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student (Previous), Tokyo Institute of Technology
Manager, Nihon Sheet Glass Co., Ltd., Dr. Eng.

得られた実験結果を用いて、まず多点参照の偏分反復法によるモード特性同定を行う。応答値に関する記号の定義を図5に示す。地震動実験の結果をLv1, Lv3'で分類し、各々入力エネルギーについて規準

図1 自立型ガラス壁 試験体

図2 試験体 SR1 (リブ付自立壁)

図 4 振動実験セットアップ SR1

図3 自立型ガラス壁 試験体 部分詳細

表 1 入力地震波

地震波	原波最大速度(m/s)	最大加速度(m/s ²)			
		原波	Lv1	Lv2	Lv3'
El-centro NS	0.334	3.42	2.56	5.12	9.24
Hachinohe NS	0.346	2.30	1.66	3.32	5.99
JMA-Kobe	0.917	8.21	2.24	4.47	8.07

表2 自立型ガラス壁 1次モード同定値

試験体		SR1		NR1		NR2	
入力レベル		Lv1	Lv3'	Lv1	Lv3'	Lv1	Lv3'
固有振動数(Hz)		12.3	10.1	13.4	10.3	6.5	5.4
減衰定数(%)		12.2	18.9	16.1	29.0	9.7	14.1
刺激関数	v_C	1.54	1.79	1.65	1.84	1.76	1.91
	x_C	0.83	0.94	0.88	0.92	0.92	0.96
	u_C	0.12	0.09	0.10	0.00	0.07	0.01

図5 自立型ガラス壁 各応答値の関係

図6 中央面ガラス頂部絶対加速度 v_c 周波数応答関数 sweep 载荷実験 自立型ガラス壁

図7 中央面ガラス頂部絶対加速度 v_c 周波数応答関数 Lv1 地震動実験 自立型ガラス壁

図8 中央面ガラス頂部絶対加速度 v_c 周波数応答関数 Lv3'地震動実験 自立型ガラス壁

図9 最大応答変位分布 地震動実験 自立型ガラス壁

図10 最大応答加速度分布 地震動実験 自立型ガラス壁

図11 $Q-u_c$ 関係 定常振動

図12 $M_\theta-\theta_c$ 関係 定常振動

化した上で平均化する。得られた周波数応答関数を比例減衰系と仮定し曲線適合を行う。同定結果を図7～8及び表2に、sweep 载荷実験の周波数応答関数(図6)と合わせて示す。後に述べるようにガラスを支持するセッティングブロックはパイ・リニア型の履歴特性を有するため、弾性範囲の振幅に留まるLv1地震動実験結果と大きく滑り領域に入る sweep 载荷実験では周期特性が大きく異なっている。従っ

て各試験体の動的特性は入力に依存するが、地震動実験より得られた表2の固有値を地震入力時の動的特性と見做すと、今回想定した範囲の自立型ガラス壁試験体は総じて短周期であり、10%前後の減衰定数を有する。また、入力の増大に伴い固有周期及び減衰定数が増大する傾向が見られる。

各試験体の地震入力に対する最大応答を図9, 10に示す。Lv3'地震入力では壁上部の応答が下部に比べ増大するものの、Lv1地震入力において各試験体のガラス応答加速度は地動加速度にほぼ等しく、応答変位も小さい。従って、一般的な周期特性の地震入力に対し中規模程度の自立型ガラス壁はあまり応答増幅されないといえる。SR1とNR1は固有値、地震応答共に同程度であり、リブガラス付加による剛性と質量の変化が互いに相殺されている。NR2はSR1, NR1より長周期であり、応答変位も大きい。

また、図11, 12の荷重-変形関係を見ると、並進成分 $Q-u_c$ ではNR2のみ異なる履歴性状を示し、ガラス下に設置したセッティングブロックが並進復元力特性に寄与することが推察される。回転成分 $M_\theta-\theta_c$ は各試験体に異なる性状を示し、NR1は履歴形状に乱れを生じ、回転によるセッティングブロックの浮き上がりが衝撃力を生じていると考えられるが、SR1は乱れを生じておらず、リブガラスの拘束効果が浮き上がりを緩和していると考えられる。NR2では、セッティングブロックがガラス中心に位置するため浮き上がりを生じず、線形に近い履歴を示す。このように、セッティングブロックの種類、位置が並進及び回転の復元力特性に与える影響は大きい。

そこで、セッティングブロックの効果を含みガラス壁並進成分の復元力特性を検証するため、ガラス壁下部の水平変形のみを拘束し、上下やロッキングに関しては拘束せずに架台を強制水平変形させる

ん断載荷実験を行う。試験は NR1, NR2 に対して実施し、加振振動数及び加振振幅を変化させる。実験結果より得られた荷重－変形関係を図 13 に示す。なお、履歴ループが途中で終わっている箇所は最大変位点で载荷を終了している。各試験体とも振動数依存性は小さく、履歴形状はバイリニアの特性を有している。これより、ガラス基部並進変位時には、ガラス下端とセッティングブロック支持面の摩擦力によりセッティングブロックが変形し、摩擦ダンパーに似た挙動を示すと考えられる。なお、セッティングブロックは引張力を負担しないため、セッティングブロックがガラス中心のみに位置する場合を除き、ガラスの回転変形による浮き上がりが生じる。これが回転成分及び鉛

図 13 $Q-u_C$ 関係 ガラス基部せん断載荷実験

図 14 3 自由度系振動解析モデル

直並進成分に非線形性を与えるため、ガラス壁では水平並進成分に加え、鉛直並進成分と回転成分の連成を考慮する必要がある。

2.2. 自立型ガラス壁の応答解析

実験結果を基に、自立型ガラス壁の振動モデルを構築する。リブガラスを含め全てのガラスが等しく変位する剛体と仮定すると、自立型ガラス壁は図 14 に示すような水平と鉛直方向の並進、及び回転からなる 3 自由度系で定義できる。これを運動方程式で表すと次式となる。

$$\begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} + [K] \begin{pmatrix} x \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + [C] \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} + \{F^{(0)}\} = - \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{y} \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

$$[K] = \begin{pmatrix} K_x & -K_x L_0 & 0 \\ -K_x L_0 & K_\theta + K_x L_0^2 + \sum_{i=1}^3 (K_{zi} + K'_{zi}) l_{ai}^2 & \sum_{i=1}^3 (K_{zi} - K'_{zi}) l_{ai} \\ 0 & \sum_{i=1}^3 (K_{zi} - K'_{zi}) l_{ai} & \sum_{i=1}^3 (K_{zi} + K'_{zi}) \end{pmatrix}$$

$$[C] = \begin{pmatrix} C_x & -C_x L_0 & 0 \\ -C_x L_0 & C_\theta + C_x L_0^2 + \sum_{i=1}^3 (C_{zi} + C'_{zi}) l_{ai}^2 & \sum_{i=1}^3 (C_{zi} - C'_{zi}) l_{ai} \\ 0 & \sum_{i=1}^3 (C_{zi} - C'_{zi}) l_{ai} & \sum_{i=1}^3 (C_{zi} + C'_{zi}) \end{pmatrix}$$

ここで、 $\{F^{(0)}\} = (0 \ 0 \ -Mg)^T$ ：初期応力項である。各並進剛性、回転剛性及び減衰はシーリング材やセッティングブロックの復元力特性を用いて付録 1 の式 (付 1)、(付 2) で与える。シーリング材に対しては、前論文³⁾で提案した非線形復元力特性を取り入れて実験結果の再現を試みる。このモデルはシーリング材等の材料非線形性、及び回転中心の変動による非線形性を含んでおり、非常に複雑なモデルと

表 3 解析対象諸元 H3・V2

試験体	SR1	NR1	NR2
L (mm)	1500	1500	1500
l (mm)	500	500	500
d (mm)	15	15	15
L_r (mm)	1500	0	0
l_r (mm)	220	0	0
d_r (mm)	40	40	40
n_g	3	3	3
d_1 (mm)	10	10	15
d_2 (mm)	15	15	15
d_3 (mm)	5	0	0
d_4 (mm)	10	0	0
d_5 (mm)	10	0	0
d_6 (mm)	11.5	0	0
t_1 (mm)	10	10	15
t_2 (mm)	15	15	15
t_3 (mm)	15	15	15
t_4 (mm)	10	10	10
t_5 (mm)	10	10	10
t_6 (mm)	15	15	15
l_{sb1} (mm)	125	125	250
t_{sb1} (mm)	24	45	45
A_{sb1} (mm ²)	1650	1650	900
n_{sb1}	2	2	1
m_g (kg)	101	101	101
m_r (kg)	33	0	0
J_g (kg・m ²)	18.98	18.98	18.98
J_r (kg・m ²)	6.19	0.00	0.00
c_b (N/mm ² ・s)	0.011	0.011	0.004

なる。そこで、より簡便で設計上利用可能なモデルとして、前論文と同様の手法で 3 自由度系モデルの各要素を等価線形化したモデルを作成する。以降は前者の精密モデルを H3、後者の簡易モデルを V2 と各々呼称し、時刻歴応答解析により実験結果との比較検討を行う。

まず、非線形 3 自由度系モデル H3 の構成について述べる。式 (1)、(付 1)、(付 2) に対しシーリング材、セッティングブロックの非線形復元力特性をモデル化し 3 自由度系モデルに組み込む。粘性減衰はバックアップ材の減衰 c_b 以外生じないと見做し、シーリング材の復元力特性は文献 3) の手法に準じ、セッティングブロックせん断復元力特性は次式の骨格曲線を有する Masing 型モデル⁴⁾で表現する。

$$\tau_{sbi} = \tau_{sb0i} \left\{ 1 - \left(\frac{\gamma_{sb0i}}{\gamma_{sbi} + \gamma_{sb0i}} \right)^{b_i} \right\} = a_i \frac{N_{sbi}}{A_{sbi}} \left\{ 1 - \left(\frac{\gamma_{sb0i}}{\gamma_{sbi} + \gamma_{sb0i}} \right)^{b_i} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $N_{sbi} = (m_g + m_r)g/n_{sbi}$: セッティングブロック 1 個に生じる垂直抗力、 γ_{sb0i} , a_i , b_i : セッティングブロックの種類で定まる定数である。セッティングブロックの軸方向復元力特性は Masing 則を応用し引張・圧縮側個別に骨格曲線を採用できるスリップ型モデルを構築する。Masing 則との相違点は履歴曲線が骨格曲線と常に同一であること、原点を通過する度に原点を始点に再設定することの 2 点である。圧縮側の骨格曲線は次式で与え、引張側では圧縮側の初期剛性を 10^5 倍した弾性ばねとする。

$$\sigma_{sbi} = \sigma_{sb0i} \left\{ 1 - \left(\frac{\varepsilon_{sb0i}}{\varepsilon_{sbi} + \varepsilon_{sb0i}} \right)^{b_i} \right\} \quad (3)$$

ここで、 σ_{sb0i} , ε_{sb0i} , b_i : セッティングブロックの種類で定まる定数である。加えて、自重による初期状態を考慮することで浮き上がりを表現する。シーリング材はガラスが直立した状態で打設されるため初期応力は生じず、ガラス壁の自重は全てセッティングブロックが負担すると見做せる。セッティングブロックの初期軸歪 $\varepsilon_{sb11}^{(0)} = \varepsilon'_{sb11}^{(0)}$ を初期軸応力 $\sigma_{sb11}^{(0)} = -Mg/2A_{sb1}$ 及び骨格曲線を用いて算出し、これを初期状態として与える。数値積分法は Wilson θ 法($\theta=1.4$)を用い、式 (4) で与えられる各要素の歪と式 (付 1) より局所剛性を逐次算出する。

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{1}{t_1}(x - L_0\theta), \quad \gamma_{11} = \frac{1}{t_1}(z + l_{a1}\theta), \quad \gamma'_{11} = \frac{1}{t_1}(z - l_{a1}\theta) \\ \gamma_2 &= \frac{l_1 + t_2}{t_2}\theta, \quad \gamma_{31} = \gamma'_{31} = \frac{l_{a2}\theta}{t_3}, \quad \gamma_6 = \frac{1}{t_6}(z + l_{a2}\theta) \\ \gamma'_6 &= \frac{1}{t_6}(z - l_{a2}\theta), \quad \gamma_{sb1} = \frac{1}{t_{sb1}}(x - L_0\theta) \\ \varepsilon_{sb11} &= \frac{1}{t_{sb1}}(z + l_{a3}\theta) + \varepsilon_{sb11}^{(0)}, \quad \varepsilon'_{sb11} = \frac{1}{t_{sb1}}(z - l_{a3}\theta) + \varepsilon_{sb11}^{(0)} \end{aligned} \quad (4)$$

続いて、各要素を等価粘性減衰を有する線形ばねに置換した等価線形モデル V2 を構築する。等価線形モデルでは鉛直並進振動を無視し、自由度を縮約し水平並進と回転からなる 2 自由度系と見なす。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + [K_I] \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} + [C_I] \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} &= - \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \ddot{y} \\ [K_I] &= \begin{pmatrix} K_x & -K_x L_0 \\ -K_x L_0 & K_\theta + \sum_{i=1}^3 (K_{zi} + K'_{zi}) l_{ai}^2 + K_x L_0^2 \end{pmatrix} \\ [C_I] &= \begin{pmatrix} C_x & -C_x L_0 \\ -C_x L_0 & C_\theta + \sum_{i=1}^3 (C_{zi} + C'_{zi}) l_{ai}^2 + C_x L_0^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

これに各要素を等価線形化した復元力特性を組み込む。シーリング材は文献 3) に従い、セッティングブロックのせん断では H3 を弾塑性系に近似した上で次式を用いて等価線形化する⁵⁾。

$$k_{sbi} = \frac{k_{sb0i}}{\mu_{sbi}}, \quad c_{sbi} = \frac{2k_{sbi}}{\mu_{sbi}\pi^2 f} (\mu_{sbi} - 1 - \ln \mu_{sbi}), \quad \mu_{sb} = \frac{\gamma_{sbmaxi}}{\gamma_{sb0i}} \quad (6)$$

ここで、 γ_{sbmaxi} : セッティングブロックの最大せん断歪、 f : モデルの 1 次固有振動数、 k_{sb0i} , γ_{sb0i} : セッティングブロックの種類で定まる定数である。セッティングブロックの軸方向復元力特性は浮き上がりによる非線形性を考慮し等価線形化を行う。具体的には浮きあがりが生じた時点でセッティングブロックが負担するモーメントは $Mg(l/2 - l_{sbi})$ で一定となるため、これをまず剛性低下型履歴に置換し、次にその骨格曲線を 2 倍に拡張した弾塑性スリップ型を等価な材料非線形性を有すると見做す。これをさらに等価線形化することで等価剛性及び等価減衰を設定する。

$$k_{sbi} = \frac{k_{sb0i}}{\mu_{sbi}}, \quad c_{sbi} = k_{sbi} \frac{\mu_{sbi} - 1 - \ln \mu_{sbi}}{\mu_{sbi}\pi^2 f}, \quad \mu_{sbi} = \frac{2k_{sb0i} A_{sbi} \varepsilon_{sbmaxi}}{(m_g + m_r)g} \quad (7)$$

ここで、 ε_{sbmaxi} : セッティングブロックの最大せん断歪、 f : 1 次固有振動数、 k_{sb0i} : セッティングブロックの種類で定まる定数である。スリップ特性を考慮し等価減衰係数 c_{sbi} は式 (6) の 1/2 とする。振動数 f や最大歪等、歪依存性を有する復元力特性のパラメータは応答解析を反復計算することで同定する。

各最大応答値の実験値と解析値とを Lv1, Lv3' 全地震入力について比較したものを図 15 及び図 16 に示す。全ケースを通じたシーリング材の最大せん断歪は 35% 程度となっている。同図より、H3, V2 ともに実験値と良好な対応を示しており、前論文で提案した履歴モデルを用いた 3 自由度系モデルで自立型ガラス壁の地震時挙動を表現できること、上記の歪レベルでは等価線形化による簡易モデルも有効であることが分かる。

図 15 最大応答変位比較

図 16 最大応答加速度比較

3. 懸垂型ガラス壁の振動特性

3.1. 懸垂型ガラス壁の振動実験

実際のガラス壁は建物に組み込まれた形で存在するため、主架構がガラス壁に与える影響を把握することが求められる。そこで、鉄骨架構に組み込まれた懸垂型ガラス壁の振動実験を行い、主架構がガラス壁に与える影響を調査する。試験体はガラス壁部分の仕様を同一とし、主架構特性をパラメータとして図 17、18 及び表 4 に示す 5 種類を用意する。HR1 はブレースを付加し主架構を剛に近づける（想定固有振動数 40Hz）ことでガラス壁部分固有の挙動を検証する試験体で、HR1s では HR1 にリブガラス間の横つなぎ材を付加しその影響を調査する。HR2 はガラス幅 1m 当り 1.5t の質量を有する 1 層建物を想定し、鉄骨架構に組み込まれたガラス壁を 1/3.6 に縮小した試験体で、錘により主架構の固有振動数を 5.8Hz に調整する。同様に面ガラスにも慣性質量を付加し周期を実大と整合させる。HR3 及び HR3b は主架構の動的特性を確認するためにガラスを排した試験体である。面外方向は横補剛治具で拘束し、加振方向は面内方向のみとする。試験は自立型ガラス壁と同様、sweep 載荷実験、定常振動入力及び地震動実験とする。入力地震波は自立型と同様 Lv1、Lv3' を用いるが、比較的長周期となる HR2 に関しては原波を最大地動速度 0.50m/s で規準化した Lv2 を Lv3' の代わりに用いる。

地震動実験の結果を Lv1、Lv3'、Lv2 で分類・平均化し、得られた周波数応答関数及びモード特性同定結果を図 20 及び表 5 に示す。全ての試験体で Lv1、Lv3'、Lv2 地震応答各々の周期特性は近い値を示し、自立型ガラス壁と比較し非線形性は低減している。表 5 の固有値

図 17 懸垂型ガラス壁 試験体

図 18 懸垂型ガラス壁試験体

表 4 懸垂型ガラス壁 実験条件

試験体	ガラス	錘	ブレース	横つなぎ材
HR1	○	—	○	—
HR1s	○	—	○	○
HR2	○	○	—	—
HR3	—	○	—	—
HR3b	—	○	○	—

図 19 懸垂型ガラス壁 各応答値の関係

を地震入力時の動的特性と見做すと、HR2 の 1 次固有振動数は主架構の固有振動数と同程度となり、主架構の特性が支配的となる。一方、HR1 及び HR1s では 1 次固有振動数と主架構単体の固有振動数 40Hz とに差があり、ガラス壁部分固有の特性が表れている。減衰定数はガラス壁自身で 6~19%程度、架構に対し 3%程度の値となった。

各試験体の地震最大応答を図 21, 22 に示す。Lv3'地震応答がやや増大するものの、Lv1 地震入力時の HR1 及び HR1s の応答加速度は地

動加速度にほぼ等しく、応答変位も小さい。したがって、5.4m 程度以下の中規模懸垂型ガラス壁自身は一般的な周期特性の地震入力に対しあまり応答増幅されないといえる。なお、振動モードは、ガラス壁中央部が大きく卓越する振動形態となる。HR1s は HR1 より応答変位が小さく、横つなぎ材により応答変位が低減することが分かる。一方、HR2 では主架構の応答変位、応答加速度ともに応答が増幅され、ガラス壁は主架構に追従し、上部でより変形する振動形態となる。

図 20 下段中央部ガラス頂部絶対加速度 v_{1C} 周波数応答関数 懸垂型ガラス壁

図 21 最大応答変位分布 地震動実験 懸垂型ガラス壁

図 22 最大応答加速度分布 地震動実験 懸垂型ガラス壁

表 5 懸垂型ガラス壁 1 次モード同定値

試験体	HR1	HR1s	HR2
入力レベル	Lv1	Lv3'	Lv1
固有振動数(Hz)	20.3	17.2	23.3
減衰定数(%)	11.1	19.0	5.9
刺激関数	x_f	0.46	0.38
	v_{2C}	1.35	1.44
	x_{2C}	1.50	1.67
	u_{2C}	1.66	1.91
	v_{1C}	1.19	1.59
	x_{1C}	0.62	0.85

(図 21, 22 凡例)

図 23 面ガラス 荷重-変形関係 JMA-Kobe Lv3'・Lv2

図 24 Q_f-x_f 関係 定常振動

図 24 に示す主架構単体の荷重－変形関係では、ブレースのない HR3 はほぼ弾性で減衰が小さく、ブレース付きの HR3b は剛性が大きく、履歴減衰を有する。これらの特徴が HR1, HR1s, HR2 の荷重－変形関係 (図 23), 地震応答及び固有振動数に反映されている。

3.2. 懸垂型ガラス壁の応答解析

自立型ガラス壁と同様、懸垂型ガラス壁に対しても、前論文 3) で提案したシーリング履歴特性を用いた応答評価を試みる。ガラスを全て剛体とし、同じ段の面ガラスは等しく変位するものと仮定すると、上段・下段各々について面ガラスの自由度は水平・鉛直の並進成分と回転の 3 自由度の計 6 自由度存在する。加えて、主架構は水平方向の並進のみ、リブガラスは回転変形のみ各々振動すると仮定すれば、懸垂型ガラス壁は図 25 及び付録 2 の式 (付 3), (付 4) に示す 8 自由度系のモデルと捉えることができる。これに対し各要素の非線形復元力特性を取り入れることで、実験結果の再現を試みる。また自立型ガラス壁と同様、簡易モデルとして 8 自由度系モデルを等価線形化したモデルを作成し、前者を H8, 後者を V6 と各々呼称する。

まず、非線形 8 自由度系モデル H8 を構築する。H3 と同様、シーリング材、セッティングブロックの非線形復元力特性モデルを組み込み、粘性減衰はバックアップ材の減衰 c_b 以外生じないと見做す。ブレース付主架構の HR1, HR1s では、実験結果にみられた主架構水平方向並進の非線形復元力特性を次式の骨格曲線を有する Masing 型モデルで表現する。

$$Q_f = Q_{f0} \left\{ 1 - \left(\frac{x_{f0}}{x_f + x_{f0}} \right)^b \right\} \quad (8)$$

ここで、 Q_{f0} , x_{f0} , b : 主架構の仕様で定まる定数である。主架構にブ

レースがない HR2 の場合、主架構質量 $M_f=870.23(\text{kg})$ と HR3 の sweep 載荷実験より求めた固有振動数実験値 $f_f=5.79(\text{Hz})$ を用いて、弾性剛性 $K_f=4\pi^2 f_f^2 M_f=1151(\text{N/mm}^2)$ を与える。また、シーリング材 S3 の軸方向復元力特性は引張と圧縮で異なる弾性剛性を有する非線形ばねとしてモデル化する。

$$k_i = \begin{cases} k_t & \varepsilon_i \geq 0 \\ k_p & \varepsilon_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

時刻歴応答解析の数値計算法は H3 と同様であり、上段、下段各々についてセッティングブロックが面ガラスの自重を全て負担すると見做し初期状態を算出する。

一方、等価線形モデル V6 では鉛直並進振動が生じないとすると、水平方向並進と回転からなる 6 自由度系と見做せる。これに V2 と同じシーリング材、セッティングブロックの等価線形復元力特性モデルを組み込む。主架構の水平方向並進復元力特性は HR2 の場合 H8 と同一とし、HR1, HR1s では次式で等価線形化する。

$$K_f = \frac{K_{f0}}{\mu_f}, \quad C_f = \frac{2K_f}{\mu_f \pi^2 f} (\mu_f - 1 - \ln \mu_f), \quad \mu_f = \frac{x_{f\max}}{x_{f0}} \quad (10)$$

ここで、 $x_{f\max}$: 主架構の最大並進変位、 f : モデルの 1 次固有振動数、 K_{f0} , x_{f0} : 主架構の仕様で定まる定数である。また鉛直自由度がない場合、シーリング材 S3 の軸剛性 k_{32} , k'_{32} は常にどちらかが圧縮、もう片方が引張を生じ、全体は線形と見做せるため解析上 $k_i = (k_t + k_p)/2$ とする。V2 と同様に、等価線形化した復元力特性のパラメータは応答解析の反復計算により同定する。

各最大応答値の実験値と解析値とを Lv1, Lv3', Lv2 全地震入力について比較したものを図 26 及び図 27 に示す。シーリングの最大せん断歪は 25% 程度であった。リブガラス、つなぎ材の個材振動の影響

- x_f : 水平方向並進変位 (重心水平変位)
- θ_i : 回転変位 (ロッキング)
- z_i : 鉛直方向並進変位
- $u_i = x_i - L_i \theta_i / 2$: 基部水平変位
- $v_i = x_i + L_i \theta_i / 2$: 頂部水平変位
- $M_i = n_g m_{gi}$: 面ガラス慣性質量
- m_{gi} : 面ガラス 1 枚の質量
- $J_i = n_g J_{gi}$: 面ガラス重心の慣性モーメント
- J_{gi} : 面ガラス 1 枚の重心の慣性モーメント
- n_g : ガラス構面数
- $n_{sb i}$: セッティングブロック個数
- $A_{sb i}$: セッティングブロック断面積 (幅×長さ)
- ($i=1$: 下段面ガラス $i=2$: 上段面ガラス)
- x_f : 主架構水平方向並進変位
- θ_i : リブガラス回転変位
- $M_3 = (n_g + 1) m_r$: リブガラス慣性質量
- m_r : リブガラス 1 枚の質量
- $J_3 = (n_g + 1) J_r$: リブガラス回転中心の慣性モーメント
- J_r : リブガラス 1 枚の回転中心の慣性モーメント
- n_r : リブガラス合わせ枚数
- I_f : 主架構柱の断面 2 次モーメント
- M_f : 主架構慣性質量
- $K_f \cdot C_f$: 主架構水平方向並進剛性・粘性減衰
- $K_x \cdot C_x$: 水平方向並進剛性・粘性減衰
- $K_\theta \cdot C_\theta$: 回転剛性・粘性減衰
- $K_i^{\prime 0} \cdot C_i^{\prime 0}$: 鉛直方向並進剛性・粘性減衰

図 25 8 自由度系振動解析モデル

表 6 解析対象諸元 H8・V6

l (mm)	500	d_1 (mm)	10
d (mm)	15	d_2 (mm)	15
L_1 (mm)	742.5	d_3 (mm)	15
L_2 (mm)	742.5	d_4 (mm)	15
n_g	3	d_5 (mm)	10
l_r (mm)	220	d_6 (mm)	12.5
d_r (mm)	19	d_7 (mm)	10
L_r (mm)	830	d_8 (mm)	5
L_{r1} (mm)	62.5	t_1 (mm)	10
L_{r2} (mm)	30	t_2 (mm)	15
n_r	2	t_3 (mm)	15
L_{im} (mm)	700	t_4 (mm)	15
l_{im} (mm)	174	t_5 (mm)	10
d_{im} (mm)	19	t_6 (mm)	15
φ_d (mm)	80	t_7 (mm)	10
φ_s (mm)	12	t_8 (mm)	10
l_j (mm)	60	c_b (N/mm ² ·s)	0.011
t_j (mm)	9	m_g 1(kg)	50.35
L_{j1} (mm)	50	m_g 2(kg)	50.35
L_{j2} (mm)	720	m_r (kg)	17.35
I_f (10 ⁻⁴ mm ⁴)	129.4	J_g 1(kg·m ²)	2.509
l_{sb1} (mm)	250	J_g 2(kg·m ²)	2.509
t_{sb1} (mm)	45	J_r (kg·m ²)	3.984
A_{sb1} (mm ²)	1650		
n_{sb1}	1	<div>M_f(kg)</div> <div><div>HR1</div><div>HR1s</div><div>HR2</div></div> <div><div>271.7</div><div>271.7</div><div>870.2</div></div>	
l_{sb2} (mm)	10.75		
t_{sb2} (mm)	4.5		
A_{sb2} (mm ²)	375		
n_{sb2}	2

図 26 最大応答変位比較

図 27 最大応答加速度比較

や、左右ガラスパネルの応答の差異を提案モデルで表現できていない等より応答が自立型ガラス壁より精度は劣るものの、H8、V6ともに実験値と概ね対応が見られ、8自由度モデルで懸垂型ガラス壁の地震時挙動を概ね表現できることや、上記範囲内で等価線形化による簡易モデルも有効であることが分かった。

4. ガラス壁と主架構の相互関係に関する解析的検討

自立型、懸垂型ガラス壁の振動実験より、提案した解析モデルがガラス壁の応答を概ね模擬できることを確認した。そこで同解析モデルを用いて、主架構によるガラス壁の応答増幅について検討する。解析対象及び入力地震波はHR2と同一とし、主架構剛性 K_f のみパラメータとして変化させる。また、主架構に対するガラスの応答増幅を表すために、ガラスパネルの上部、中央部、下部の最大応答加速度を主架構最大応答加速度で除したガラス加速度応答倍率を定義する。

$$R_{v_i} = \frac{v''_{i\max}}{x''_{f\max}}, R_{x_i} = \frac{x''_{i\max}}{x''_{f\max}}, R_{u_i} = \frac{u''_{i\max}}{x''_{f\max}} \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

主架構振動数 $f_f = \sqrt{K_f / (2\pi\sqrt{M_f})}$ が5~45(Hz)の領域におけるガラス加速度応答増幅率の推移を図28に示す。同図より、HR2モデルにおいて上段ガラスの下部、下段ガラスの上部が大きく応答する場合があるものの、主架構に対するガラス壁の加速度応答倍率は最大1.6倍程度に留まることが分かる。

5. 結

自立型ガラス壁と懸垂型ガラス壁について振動台実験を実施し、その動的特性を把握するとともに、地震応答を表現できる振動解析モデ

図 28 ガラス加速度応答倍率の推移 HR2

ルを構築し比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) ガラス壁自身の固有振動数は入力地震波の加速度応答スペクトルと比較して高く、10mを超える大きな壁にならないと面内加速度応答増幅は生じず、地動レベルの加速度に留まる。
- 2) 今回の実験範囲では、自立型ガラス壁の等価減衰定数は小振幅で6~16%、懸垂型では7~19%となった。フレーム付き懸垂型ガラス壁の等価減衰は約3%であった。
- 3) 剛性、等価減衰に関してはシーリングのみならず、ガラス下部に設置するセッティングブロックが大きな影響を与える。
- 4) 前論文で提案したシーリング材の非線形履歴モデル及びセッティングブロックの履歴モデルを用いて提案した振動解析モデルは、実験結果を精度良く再現し得ることを確認した。また、等価線形化法を用いた等価線形減衰モデルも、シーリング材の最大せん断歪35%程度以下の範囲で概ね良い精度を示すことが分かった。

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) 竹内徹, 田中栄次, 久田隆司, 片野史大: ガラス壁面に組み込まれたシーリング材の動的特性, 日本建築学会構造系論文集第625号, pp.481-488, 2008.3
- 4) 大崎順彦: 建築振動理論, 彰国社, 1999.4
- 5) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 明文社, 2003.10

付録 1. 自立型ガラス壁 3 自由度系振動解析モデルにおける剛性・減衰係数

$$K_x = n_g \left\{ k_1 \frac{2d_1}{t_1} l + (k_p + k_t) \frac{d_4}{t_4} l_r + n_{sb1} k_{sb1} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}} \right\}$$

$$K_\theta = (n_g - 1) k_2 \frac{d_2}{t_2} (l + t_2) L l + n_g (k_{31} + k'_{31}) \frac{2d_3}{t_3} (l - 2l_{a4}) l_{a4}^2 \quad (\text{付 1})$$

$$K_{z1} = n_g k_{11} \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a1}), K_{z2} = n_g k_6 \frac{d_6}{t_6} L, K_{z3} = n_g k_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}$$

$$K'_{z1} = n_g k'_{11} \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a1}), K'_{z2} = n_g k'_6 \frac{d_6}{t_6} L, K'_{z3} = n_g k'_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}$$

$$C_x = n_g \left\{ (c_1 + c_b) \frac{2d_1}{t_1} l + n_{sb} c_{sb1} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}} \right\}$$

$$C_\theta = (n_g - 1) c_2 \frac{d_2}{t_2} (l + t_2) L l + n_g (c_{31} + c'_{31}) \frac{2d_3}{t_3} (l - 2l_{a4}) l_{a4}^2$$

$$C_{z1} = n_g (c_{11} + c_b) \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a1}), C'_{z1} = n_g (c'_{11} + c_b) \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a1}) \quad (\text{付 2})$$

$$C_{z2} = n_g c_6 \frac{d_6}{t_6} L, C'_{z2} = n_g c'_6 \frac{d_6}{t_6} L$$

$$C_{z3} = n_g c_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}, C'_{z3} = n_g c'_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}$$

$$l_{a1} = l_{a4} = \frac{l}{3}, \quad l_{a2} = \frac{l}{2}, \quad l_{a3} = \frac{l}{2} - l_{sb1}$$

$k_1 \sim k_6$: シーリング材 S1～S6 の純せん断方向せん断剛性

$k_{11} \sim k_{31}, k'_{11} \sim k'_{31}$: S1, S3 のねじり方向せん断剛性

$k_p = 1.40(\text{N/mm}^2)$: シーリング材の圧縮剛性

$k_t = 0.66(\text{N/mm}^2)$: シーリング材の引張剛性

k_{sb1} : セッティングブロックのせん断剛性

k_{sb11}, k'_{sb11} : セッティングブロックの圧縮剛性

$c_1 \sim c_6$: S1～S6 の純せん断方向せん断粘性減衰係数

$c_{11} \sim c_{31}, c'_{11} \sim c'_{31}$

: S1, S3 のねじり方向せん断粘性減衰係数

c_{sb1} : セッティングブロックのせん断粘性減衰係数

c_{sb11}, c'_{sb11} : セッティングブロックの圧縮粘性減衰係数

c_b : バックアップ材のせん断粘性減衰係数

付録 2. 懸垂型ガラス壁 8 自由度系振動解析モデルにおける剛性・減衰係数

$$K_{x1} = n_g \left\{ k_1 \frac{2d_1}{t_1} l + n_{sb1} k_{sb1} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}} \right\}, \quad K_{x2} = n_g k_5 \frac{2d_5}{t_5} l, \quad K_{x3} = n_g k_3 \frac{d_3}{t_3} l$$

$$K_{x4} = n_g \left\{ k_7 \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right\}$$

$$K_{x5} = n_g \left\{ k_8 \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] + n_{sb2} k_{sb2} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}} \right\}$$

$$K_{x6} = \frac{96E_x I_f}{L_f^3} \quad (\text{横つなぎ材が存在しないとき } K_{x6} = 0)$$

$$K_{x51} = n_g k_{61} \frac{d_6}{t_6} \{L_2 - 2(L_{r1} - L_{a51})\}, \quad K_{x52} = -n_g k_{61} \frac{d_6}{t_6} L_{a52}$$

$$K_{x53} = n_g k'_{61} \frac{d_6}{t_6} L_{a53}, \quad K_{x54} = n_g k'_{61} \frac{d_6}{t_6} \{L_2 - 2(L_{r2} + L_{a54})\}$$

$$K_{\theta 1} = (n_g - 1) k_2 \frac{d_2}{t_2} (l + t_2) L l, \quad K_{\theta 2} = (n_g - 1) k_4 \frac{d_4}{t_4} (l + t_2) L_2 l$$

$$K_{\theta 3} = (n_g + 1) n_r \left\{ \frac{2L_{j1}(L_{j1} + L_{j2})(2L_{j1} + 3L_{j2})}{E_s l_r^3} + \frac{4L_{j2}^3}{E_g l_r^3} \right\}^{-1} L_2^2$$

$$K_{z11} = n_g k_{11} \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a11}), \quad K_{z12} = n_g k_{71} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right]$$

$$K_{z13} = n_g k_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}, \quad K_{z21} = n_g k_{51} \frac{2d_5}{t_5} (l - 2l_{a21})$$

$$K_{z22} = n_g \left[k_6 \frac{d_6}{t_6} (L_2 - L_{r1} - L_{r2}) + k_{81} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$K_{z23} = n_g k_{sb21} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}}, \quad K_{z3} = n_g k_{32} \frac{d_3}{t_3} (l - 2l_{a3})$$

$$K'_{z11} = n_g k'_{11} \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a11}), \quad K'_{z12} = n_g k'_{71} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right]$$

$$K'_{z13} = n_g k'_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}, \quad K'_{z21} = n_g k'_{51} \frac{2d_5}{t_5} (l - 2l_{a21})$$

$$K'_{z22} = n_g \left[k'_6 \frac{d_6}{t_6} (L_2 - L_{r1} - L_{r2}) + k'_{81} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$K'_{z23} = n_g k'_{sb21} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}}, \quad K'_{z3} = n_g k'_{32} \frac{d_3}{t_3} (l - 2l_{a3})$$

$$l_{a11} = l_{a21} = l_{a3} = \frac{l}{3}, \quad l_{a12} = l_{a22} = \frac{l}{2}, \quad l_{a13} = \frac{l}{2} - l_{sb1}, \quad l_{a23} = \frac{l}{2} - l_{sb2}$$

$$L_{a5} = -\frac{L_2}{2}, \quad L_{a51} = \frac{3}{4} \left(L_{r1} - \frac{L_2}{2} \right), \quad L_{a52} = \frac{L_2}{4} - \frac{L_{r1}}{2} - L_{a51}, \quad L_{a53} = \frac{L_{r2}}{2} - \frac{L_2}{4} + L_{a54}$$

$$L_{a54} = \frac{3}{4} \left(\frac{L_2}{2} - L_{r2} \right), \quad L_{p4} = L_2 + t_3, \quad L_{p5i} = \frac{L_2}{2} - L_{a5i} \quad (i = 0, \dots, 4)$$

$$C_{x1} = n_g \left\{ (c_1 + c_b) \frac{2d_1}{t_1} l + n_{sb1} c_{sb1} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}} \right\}, \quad C_{x2} = n_g (c_5 + c_b) \frac{2d_5}{t_5} l, \quad C_{x3} = n_g c_3 \frac{d_3}{t_3} l$$

$$C_{x4} = n_g \left\{ c_7 \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right\}$$

$$C_{x5} = n_g \left\{ c_8 \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] + n_{sb2} c_{sb2} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}} \right\}$$

$$C_{x51} = n_g c_{61} \frac{d_6}{t_6} \{L_2 - 2(L_{r1} - L_{a51})\}, \quad C_{x52} = -n_g c_{61} \frac{d_6}{t_6} L_{a52}, \quad C_{x53} = n_g c'_{61} \frac{d_6}{t_6} L_{a53}$$

$$C_{x54} = n_g c'_{61} \frac{d_6}{t_6} \{L_2 - 2(L_{r2} + L_{a54})\}, \quad C_{\theta 1} = (n_g - 1) c_2 \frac{d_2}{t_2} (l + t_2) L l$$

$$C_{\theta 2} = (n_g - 1) c_4 \frac{d_4}{t_4} (l + t_2) L_2 l, \quad C_{z11} = n_g (c_{11} + c_b) \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a11})$$

$$C_{z12} = n_g \left[c_{71} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$C_{z13} = n_g c_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}, \quad C_{z21} = n_g (c_{51} + c_b) \frac{2d_5}{t_5} (l - 2l_{a21}) \quad (\text{付 3})$$

$$C_{z22} = n_g \left[c_6 \frac{d_6}{t_6} (L_2 - L_{r1} - L_{r2}) + c_{81} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$C_{z23} = n_g c_{sb21} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}}, \quad C'_{z11} = n_g (c'_{11} + c_b) \frac{2d_1}{t_1} (l - 2l_{a11})$$

$$C'_{z12} = n_g \left[c'_{71} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$C'_{z13} = n_g c'_{sb11} \frac{A_{sb1}}{t_{sb1}}, \quad C'_{z21} = n_g (c'_{51} + c_b) \frac{2d_5}{t_5} (l - 2l_{a21})$$

$$C'_{z22} = n_g \left[c'_6 \frac{d_6}{t_6} (L_2 - L_{r1} - L_{r2}) + c'_{81} \frac{\pi}{8} \left[\frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_7)^2}{t_7} + \frac{\varphi_d^2 - (\varphi_d - 2d_8)^2}{t_8} \right] \right]$$

$$C'_{z23} = n_g c'_{sb21} \frac{A_{sb2}}{t_{sb2}}, \quad C_{x6} = C_{\theta 3} = C_{z3} = C'_{z3} = 0$$

$k_1 \sim k_6 \cdot c_1 \sim c_6$: シーリング材 S1～S6 の純せん断方向せん断剛性・減衰係数

$k'_{11} \sim k'_{31} \cdot c'_{11} \sim c'_{31}$: S1～S8 のねじり方向せん断剛性・減衰係数

k_{32}, k'_{32} : S3 の軸剛性

$k_p = 1.40(\text{N/mm}^2) \cdot k_t = 0.66(\text{N/mm}^2)$: シーリング材の圧縮剛性・引張剛性

$k_{sb1}, k_{sb2} \cdot c_{sb1}, c_{sb2}$: セッティングブロック SB1, SB2 のせん断剛性・減衰係数

$k'_{sb11}, k'_{sb21} \cdot c'_{sb11}, c'_{sb21}$: SB1, SB2 の軸剛性・減衰係数

c_b : バックアップ材のせん断粘性減衰係数

$E_x = 205000(\text{N/mm}^2)$: 鋼材のヤング率 $E_g = 71600(\text{N/mm}^2)$: ガラスのヤング率

(2009年 3 月 7 日原稿受理, 2009年 5 月 21日採用決定)