

粘性制震壁の粘性減衰力評価式の整合性検証

Verification of accuracy of proposed formula for Viscous Damping Wall

鈴木 利哉 TOSHIYA SUZUKI

鈴木 亨 TORU SUZUKI

岡田 泰秀 YASUhide OKADA

粘性系制振装置「制震壁」は、1994年以來、数多くの建物に設置され、安定した減衰特性データも十分収集された。筆者らは、制震壁の粘性減衰力評価式の統一化を試み、粘性減衰力評価式の整合性を確認した。また、制震壁のアスペクト比を用いて、制震壁の直列バネを考慮した簡易式の整合性も確認した。新粘性減衰力評価式(2002式)は、制震壁の最大変位・速度・温度・振動数の依存性をよく評価しており、適用範囲内における整合性は、平均値約1.0、変動係数0.15程度、正規分布に従っていることを確認した。

キーワード：制振装置、粘性減衰力、アスペクト比、正規分布、変動係数

Viscous Damping Walls "VDW" have been used to many buildings since 1994 and enough stable damping data have been collected. Based on these data, we tried to unify design formula of damping force and to verify the accuracy of the formula. Moreover we verify the accuracy of simple design formula that takes the stiffness of steel wall panel into account using aspect ratio of the wall. Damping properties estimated by proposed formula (type-2002) are compatible at each parameters and the accuracy shows Normal Distribution with about 1.0 in mean and about 0.15 in variation.

Key Words: Damper, Viscous Damping Force, Aspect Ratio, Normal Distribution, Coefficient of Variation

1. はじめに

当社の保有する粘性系制振装置「制震壁」に使用されている粘性体（ポリイソブチレン）は、温度依存性・振動数依存性を持つ物質であり、制震壁の粘性減衰力評価には、これらの特性を考慮する必要がある。また、制震壁の減衰特性は、基本的にはニュートンの粘性法則に基づく効果を発揮するが、使用粘性体の特性により、必ずしも速度に比例する減衰力とはならない。

制震壁は、1994年竣工のメディアシティ静岡ビル¹⁾に採用されて以来、数多くの建物に設置されている。装置の製作技術も向上し、安定した減衰特性データも十分収集された。

そこで、筆者らは、制震壁の速度・温度・振動数の依存性を考慮した、制震壁の粘性減衰力評価式の統一化を試みた。

制震壁の減衰特性は、変位-荷重履歴の横軸に制震壁の相対変位(D2,D3)を取る場合と、建物層間変位(D4-D6)を取る場合で異なり、この差は、制震壁の高さ・幅等により変化する(図-1参照)。設計では、層間変位に対して

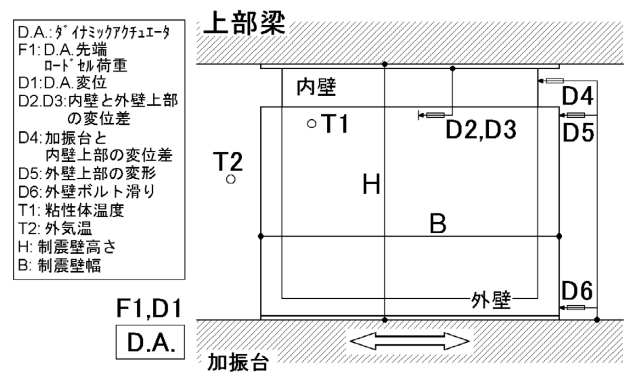


図-1 制震壁性能試験概念図

減衰を付加するべきであると考えられるが、これらを加味した設計式となると、非常に複雑なものとなる。

よって、新粘性減衰力評価式(2002式)は、制震壁の高さ・幅等の影響を考慮しなくても十分評価できると考えられる。相対変位-荷重の履歴におけるものとし、制震壁の直列バネを考慮した、層間変位-荷重の履歴における評価式は、制震壁のアスペクト比(H/B)等を用いた簡易式を別途作成し、それぞれの評価式の整合性を確認した。

表- 1 試験体と試験パラメータ

粘性体粘度: $\mu_{30}=9.000[\text{Pa}\cdot\text{s}]=9.0[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$						
件名	試験体数	設計隙間 [mm]	加振振動数 [Hz]			
A	10	5	0.35	1.00		
B	4	5	0.33	1.00		
C	43	5	0.30	1.00		
D	4	5	1.60			
E	23	5	0.56			
F	2	5	0.64	1.00	1.50	
G	5	5	0.25	0.65		
H	5	5	0.30	0.50	1.00	1.50
I	10	5	0.30	1.00		
J	1	5	0.25	0.70		
K	18	5	0.25			
L	5	5	0.20			
M	3	5	0.45			
N	1	5	0.10	0.50	1.50	
O	4	5	0.73			
P	4	5	0.68	0.84		
Q	6	5	0.40			
R	1	5	0.75			
S	2	4	0.60	1.00		
T	2	5	0.69			
U	4	5	0.60			
V	1	5	0.10	0.30	0.50	1.00
W	1	5	0.10	0.30	0.50	1.00
X	3	4	0.30	0.53		
Y	2	6	0.30	0.67		
Z	2	5	0.30	0.57		
AA	12	4	0.28	0.30		
AB	6	4	0.21	0.30	0.69	1.21
計 184 体						

せん断有効面積: 2.4~36.1㎡
 アスペクト比: 0.37~2.29
 粘性体温度: 4.05~39.5℃
 試験数: 2035回

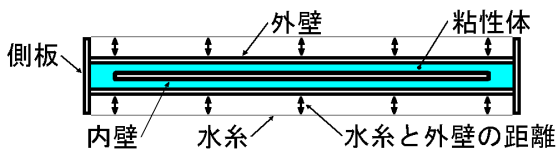


図- 2 制震壁隙間計測図

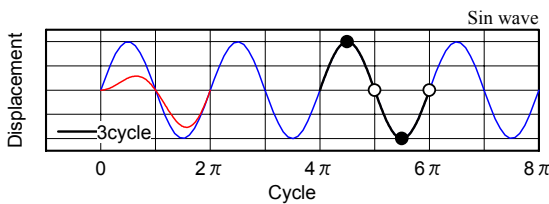


図- 3 データ使用位置

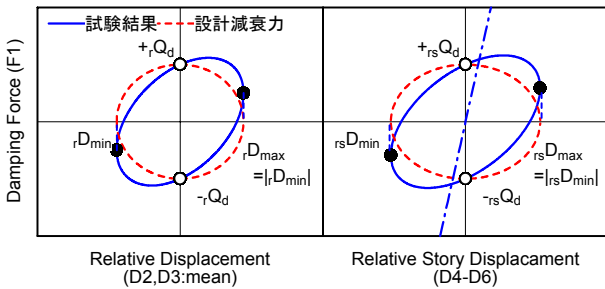


図- 4 特性値の定義

2. 試験概要

(1) 試験体と試験パラメータ

試験体と試験パラメータの一覧を表- 1 に示す。試験体はシングルタイプ・ダブルタイプ含めて計 184 体、設計隙間は 4.0・5.0・6.0mm である。

入力波は正弦波とし、加振振動数は 0.10~1.60Hz、各試験で目標最大変位を変え、試験数は 2035 回である。

(2) 試験方法および計測項目

制震壁性能確認試験の載荷装置および計測点の一覧を

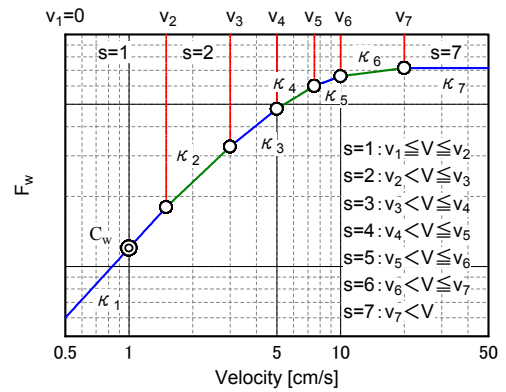


図- 5 制震壁の粘性減衰力の概念図

図- 1 に示す。試験は、制震壁の内壁を上部梁に固定し、外壁を取り付けた加振台をダイナミックアクチュエータによって水平に加振した。

計測項目は、制震壁の変位-荷重の関係を評価するために、制震壁の粘性減衰力 F_1 、制震壁の相対変位 D_2 、 D_3 、建物層間変位 D_4 、外壁固定ボルトの滑り D_6 を動的に計測し、温度依存性を評価するために、粘性体温度 T_1 を試験前後に計測した。また、制震壁せん断隙間 dy は、側板幅および側板に張った水系から外壁までの実測距離と、設計板厚から実測値を計算した。(図- 2 参照)

3. 2002 式の粘性減衰力評価法

(1) 使用データと特性値

制震壁の減衰特性を評価するために使用するデータの位置を図- 3 に示す。2002 式の作成および整合性確認は、正弦波入力において減衰性能の安定する 3cycle 目(漸増波含む)のものとした。

特性値の概念図を図- 4 に示す。特性値は、相対変位 (D_2, D_3 の平均)および層間変位 (D_4-D_6)と荷重 (F_1) の履歴において、 y 切片荷重 Q_d は y 切片の正負を平均して、速度 V は y 切片通過時の相対変位を微分して求めた。粘性体温度 t は熱電対 (T_1) の試験前後の平均値とした。また、制震壁の隙間は、設計値ではなく実測値を使用した。

(2) 粘性減衰力 F_w

制震壁の粘性減衰力の概念図を図- 5 に示す。制震壁の粘性減衰力 F_w は、減衰係数 C と速度 V 、および減衰力の速度に対する非線形剰数 κ により、式(1)~(3)のように表現する。

粘性減衰力の速度に対する非線形性は、6 折れ点により表現し、非線形剰数 κ は速度区間毎に設定する。また、初期減衰係数 C_w は、加振振動数と温度の依存性を考慮した粘性体粘度 $\mu_{(t)}$ 、制震壁のせん断有効面積 A_w 、お

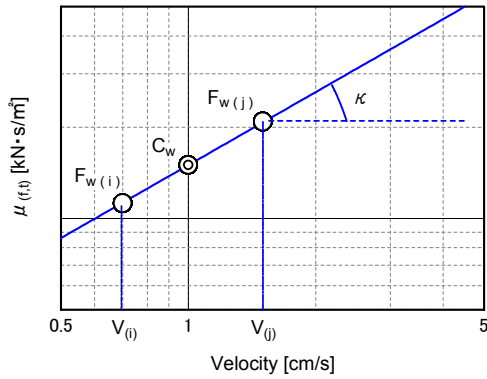


図-6 C_w, κ の算出法

よび制震壁のせん断隙間 dy により，式(4)のように表現する。

層間変位と荷重の履歴に適用する場合は，粘性減衰力および速度を，それぞれ式(5)，式(6)のように表現する。

式(1)～(6)において未知数となる $\mu_{(f,t)}$ ， κ ， β ， γ は，試験時の速度，温度，振動数等をパラメータとし，回帰により求める。

$${}_rF_w = C \cdot {}_rV^\kappa \quad (1)$$

$$C = C_w \cdot C_{a(s)} \quad (2)$$

$$C_{a(s)} = v_1^{\{\kappa(1-\kappa^2)\}} \times \dots \times v_s^{\{\kappa(s-1)-\kappa(s)\}} \quad (3)$$

$$C_w = \alpha \cdot \mu_{(f,t)} \cdot A_w / dy \quad (4)$$

$${}_{rs}F_w = \beta \cdot {}_rF_w \quad (5)$$

$${}_{rs}V = \gamma \cdot {}_rV \quad (6)$$

F_w ：粘性減衰力[kN]

C ：減衰係数[kN·s/cm]

V ：速度[cm/s]

κ ：減衰力の速度に対する非線形剰数

C_w ：初期減衰係数[kN·s/cm]

$C_{a(s)}$ ：初期減衰係数を速度区間 s における

減衰係数に変換する係数

(※速度区間 s=1 の時 $C_a=1.0$)

$v_{(s)}$ ：速度区間の変更点[cm/s]

$\kappa_{(s)}$ ：速度区間 s における非線形剰数

s：速度区間(=1, 2, ..., 7)

$\mu_{(f,t)}$ ：振動数 f, 粘性体温度 t における

粘性体粘度[kN·s/m²]

A_w ：制震壁のせん断有効面積[m²]

dy：制震壁のせん断隙間[cm]

α ：係数(=1.0)

β, γ ：アスペクト比と振動数に依存する係数

${}_r^*$ ：相対変位の履歴による値

${}_{rs}^*$ ：層間変位の履歴による値

式(1)～(3)は一般形であるが，step by step の増分形で表現すると式(7)～(9)のようになる。

$$F_{w(i)} = F_{w(i-1)} + \kappa_{(i-1)} \cdot C_{(i-1)} \cdot V_{(i-1)}^{\{\kappa_{(i-1)}-1\}} \cdot \Delta V \quad (7)$$

$$C_{(i)} = C_w \cdot C_{a(i)} \quad (8)$$

$$C_{a(i)} = C_{a(i-1)} \cdot V_{(i-1)}^{\{\kappa_{(i-1)}-\kappa_{(i)}\}} \quad (9)$$

_(i)：ステップ i における

(※ステップ i=1 の時 $C_{a(i)}=1.0$)

ΔV ：速度差[cm/s]

(3) 粘性体粘度 $\mu_{(f,t)}$

制震壁に使用されている粘性体は，温度依存性・振動数依存性を持つ物質であり，粘性体粘度 $\mu_{(f,t)}$ は，式(10)～(13)の条件を満たすと考えられる。これらの条件を満たす回帰式を式(14)と仮定して，試験結果の回帰により $\mu_{(f,t)}$ の温度および振動数の依存性を求める。

$$\lim_{f \rightarrow \infty} \{\mu_{(f,t)}\} = 0 \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{\mu_{(f,t)}\} = 0 \quad (11)$$

$$\lim_{f \rightarrow 0} \{\mu_{(f,t)}\} = \mu_{(t)} \quad (12)$$

$$\lim_{f \rightarrow 0, t \rightarrow 30} \{\mu_{(f,t)}\} = \mu_{30} \quad (13)$$

$$\mu_{(f,t)} = \mu_{30} \cdot e^{-a_1(t-30)-a_2} \quad (14)$$

μ_{30} ：粘性体温度 30°C の時の

粘性体粘度[kN·s/m²]

t：粘性体温度[°C]

f：建物 1 次固有振動数[Hz]

a_1, a_2 ：係数

$\mu_{(f,t)}$ を求めるための， C_w の算出法の概念図を図-6 に示す。制震壁の粘性減衰力は，速度に非線形な減衰力であり，高速度領域において減衰力の非線形性が顕著となる。そのため，高速度領域の粘性体粘度は，振動数と温度による依存性だけで表現することが難しい。また，微小速度領域においては，粘性減衰力の非線形性は目立たないが，計測誤差等により，データのばらつきが大きくなる。

式(1)は，“速度区間 s=1 で $\kappa=1.0$ ” という条件下において，速度 $V=1.0$ cm/s の粘性減衰力 $F_{w(V=1.0)}$ が初期減衰係数 C_w と等しくなる。実際 y 切片通過時に $V=1.0$ cm/s という試験結果は無いので，“ κ は $0.5 \leq V \leq 1.5$ において一定” という前提のもと，同一振動数の $0.5 \leq V \leq 1.5$ における F_w 2 点 i, j の対数上での 1 次回帰式(16), (17)より $F_{w(V=1.0)}$

を求め、式(18)により粘性体粘度 $\mu_{(t,i)}$ を求める。なお、この時の粘性体温度は双方の平均とし、誤差を小さくするために、2点の温度差は3℃以内のもののみを使用する。

$$\begin{aligned} \log[F_w] &= \log[C \cdot V^\kappa] \\ &= \log[C] + \kappa \cdot \log[V] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \log[F_{w(i)}] &= \log[C] + \kappa \cdot \log[V_{(i)}] \\ \log[F_{w(j)}] &= \log[C] + \kappa \cdot \log[V_{(j)}] \\ \log[F_{w(j)}] - \log[F_{w(i)}] &= \kappa \cdot \{\log[V_{(j)}] - \log[V_{(i)}]\} \\ \kappa &= \{\log[F_{w(j)}] - \log[F_{w(i)}]\} / \{\log[V_{(j)}] - \log[V_{(i)}]\} \\ &= \log[F_{w(j)}/F_{w(i)}] / \log[V_{(j)}/V_{(i)}] \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_w = C = F_{w(i)} / (V_{(i)})^\kappa = F_{w(j)} / (V_{(j)})^\kappa = F_{w(V=1.0)} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mu_{(t,i)} &= C_w \cdot dy / A_w \\ &= F_{w(V=1.0)} \cdot dy / A_w \end{aligned} \quad (18)$$

(4) 非線形剰数 κ

制震壁の粘性減衰力の速度に対する非線形性は、速度と振動数に依存するものであり、非線形剰数 κ は、式(19),(20)の条件を満たすと考えられる。この条件を満たす回帰式を式(21)と仮定して、試験結果の回帰により κ の速度および振動数の依存性を求める。

$$\lim_{V \rightarrow 0} \{\kappa(V)\} = 1.0 \quad (19)$$

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \{\kappa(V)\} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \kappa &= 1 - k_1 \cdot V \quad \text{※ } \kappa \geq 0 \\ k_1 &: \text{係数} \end{aligned} \quad (21)$$

κ の算出は、粘性体粘度と同様に、同一振動数における速度の異なる F_w 2点 i, j より式(16)を用いて行う。なお、この時の速度は2点の速度の小さい方の値とし、2点の温度差は3℃以内のもののみを使用する。

(5) 層間変位-荷重履歴への適用

相対変位および層間変位と荷重の履歴における各特性値の関係は、制震壁の外壁・内壁の剛性に依存し、制震壁が完全剛体であれば等しく、剛性が小さくなるほどその差は大きくなる。この関係をアスペクト比により表すと、式(22)~(25)の条件を満たすと考えられる。この条件を満たす回帰式を式(26),(27)と仮定して、試験結果の回帰により β, γ のアスペクト比および振動数の依存性を求める。

$$\lim_{A \rightarrow 0} \{\beta_{(A)}\} = 1.0 \quad (22)$$

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \{\beta_{(A)}\} = 0 \quad (23)$$

$$\lim_{A \rightarrow 0} \{\gamma_{(A)}\} = 1.0 \quad (24)$$

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \{\gamma_{(A)}\} = \infty \quad (25)$$

$$\beta = 1 - l_1 \cdot A \quad \text{※ } \beta \geq 0 \quad (26)$$

$$\gamma = 1 + m_1 \cdot A \quad (27)$$

l_1, m_1 : 係数

A: アスペクト比(=H/B)

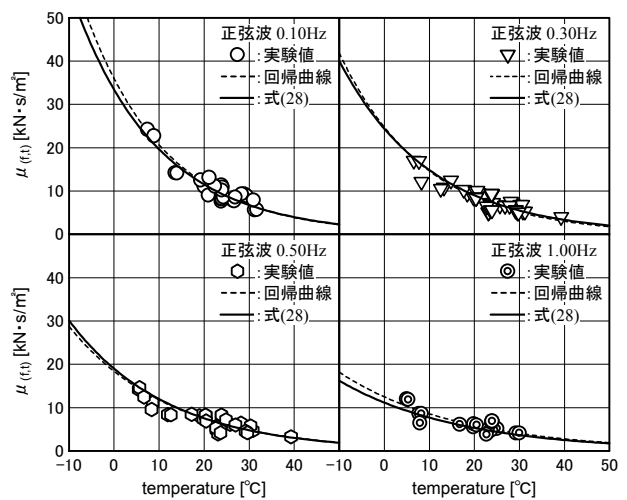


図-7 粘性体粘度の温度依存性

表-2 粘性体粘度の温度依存性回帰結果

f	a1	a2	r
0.10Hz	0.055550	0.2811	0.94911
0.20Hz	0.050100	0.3746	0.97429
0.25Hz	0.051241	0.4550	0.98143
0.30Hz	0.047574	0.5300	0.89788
0.40Hz	0.048550	0.5630	0.78166
0.50Hz	0.045000	0.7015	0.91817
0.73Hz	0.042668	0.7500	0.70406
1.00Hz	0.037550	0.7990	0.85869

4. 試験の回帰結果

(1) 粘性体粘度 $\mu_{(t,i)}$

代表的な振動数における、粘性体温度と粘度の関係、および式(14)による回帰結果を図-7に、各振動数における回帰結果を表-2に示す。また、振動数と回帰により得た a_1, a_2 の関係、および $a_1 = a_3 \cdot f + a_4, a_2 = a_5 \cdot f^{a_6}$ による回帰結果を図-8に示す。使用データは、件名 K~Q および V,W である。

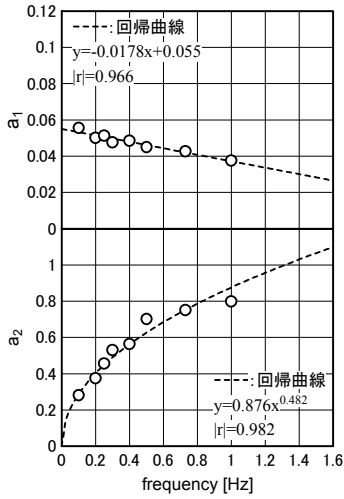


図- 8 粘性体粘度の振動数依存性

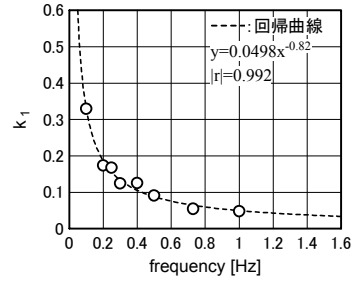


図- 10 非線形剰数の振動数依存性

表- 4 各速度区間の非線形剰数

s	v(s)	κ
1	$0.0 < V \leq 1.5$	0.0
2	$1.5 < V \leq 3.0$	$1 - 0.075 / f^{0.82}$
3	$3.0 < V \leq 5.0$	$1 - 0.150 / f^{0.82}$
4	$5.0 < V \leq 7.5$	$1 - 0.250 / f^{0.82}$
5	$7.5 < V \leq 10.0$	$1 - 0.375 / f^{0.82}$
6	$10.0 < V \leq 20.0$	$1 - 0.500 / f^{0.82}$
7	$20.0 < V$	$1 - 1.000 / f^{0.82}$

以上より式(28)を得る。式(28)を図- 7 に合わせて示す。

$$\mu_{(f,t)} = \mu_{30} \cdot e^{(-0.055(t-30) - 0.876\sqrt{f} + 0.0178f(t-30))} \quad (28)$$

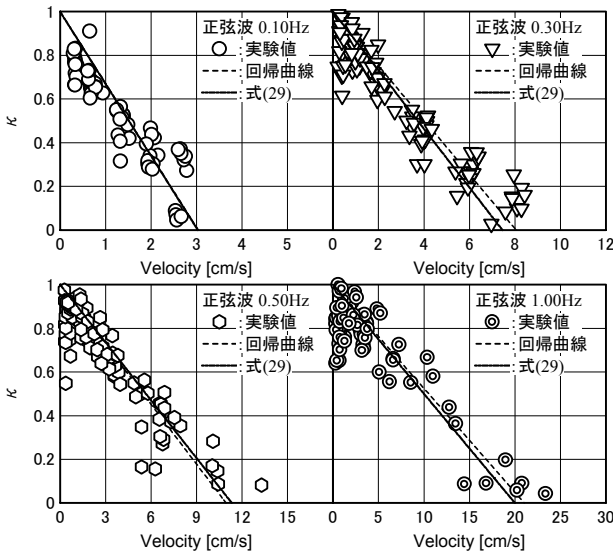


図- 9 非線形剰数の速度依存性

表- 3 非線形剰数の速度依存性回帰結果

f	$\kappa(f) = 1 - k_1 V$	
	k1	r
0.10Hz	0.32925	0.90735
0.20Hz	0.17370	0.92769
0.25Hz	0.16792	0.84719
0.30Hz	0.12422	0.93908
0.40Hz	0.12559	0.92527
0.50Hz	0.09133	0.91613
0.73Hz	0.05450	0.92281
1.00Hz	0.04753	0.88850

粘性体粘度 $\mu_{(f,t)}$ は、低温になるほど大きな値を示すことが分かる。また、粘性体粘度の温度勾配 a_1 は、低振動数になるほど大きくなること、粘性体温度が 30℃の時の粘性体粘度 $\mu_{30} \cdot e^{-a_2}$ は、高振動数になるほど小さくなること分かる。

(2) 非線形剰数 κ

代表的な振動数における速度と非線形剰数 κ の関係、および式(21)による回帰結果を図- 9 に、各振動数における回帰結果を表- 3 に示す。また、振動数と回帰により得た k_1 の関係、および $k_1 = k_2 \cdot f^{0.82}$ による回帰結果を図- 10 に示す。使用データは、件名 K~Q および V,W である。

非線形剰数 κ は、速度が大きいくほど小さな値を示すことが分かる。また、非線形剰数の速度勾配 k_1 は、低振動数になるほど大きくなること分かる。

以上より式(29)を得る。式(29)を図- 9 に合わせて示す。なお、粘性減衰力 F_w の非線形性は、6 折れ点により表現するため、式(29)は式(30)と置き換える。

速度区間の変更点 $v_{(s)}$ は、 $v_2 = 1.5 \text{ cm/s}$ を第 1 折れ点とし、“ $v_{(s)} = 0, 1.5, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0, 20.0$ ” とする。

式(30)に $v_{(s)}$ を代入した、各速度区間における κ 算定式を表- 4 に示す。

$$\kappa = 1 - 0.05V/f^{0.82} \quad \text{※ } \kappa \geq 0 \quad (29)$$

$$\kappa = 1 - 0.05v_{(s)}/f^{0.82} \quad \text{※ } \kappa \geq 0 \quad (30)$$

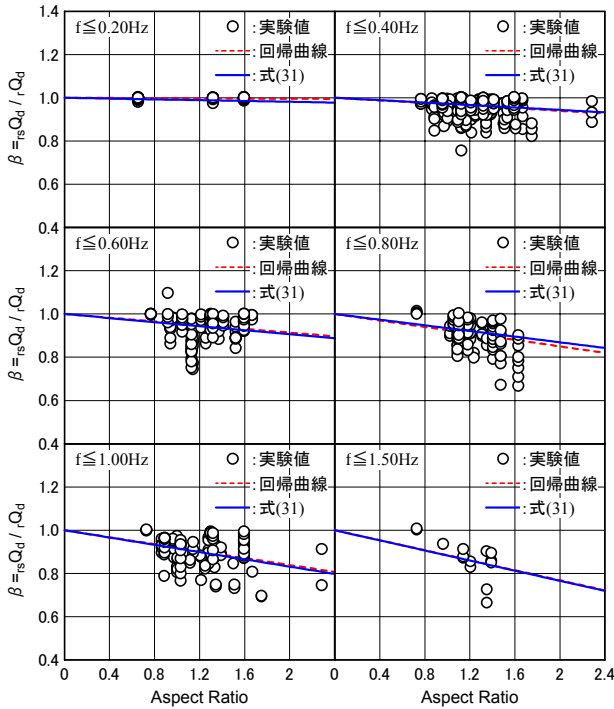


図-11 層間／相対履歴のアスペクト比依存性

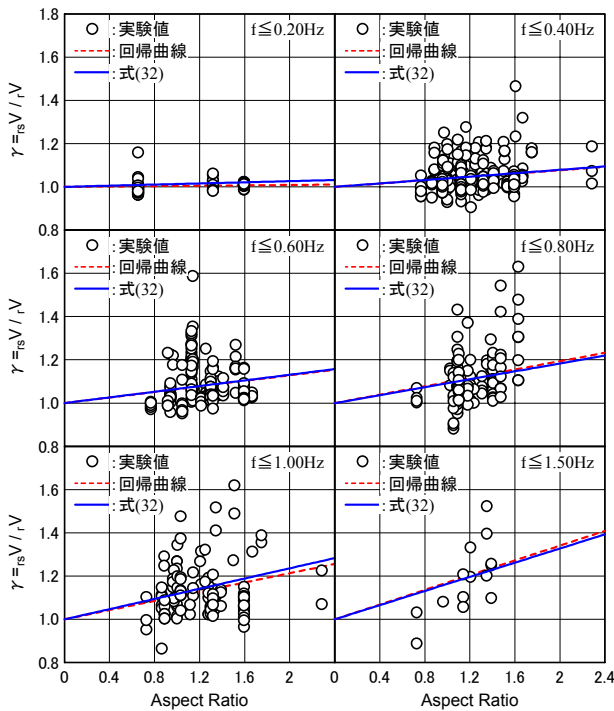


表-5 層間／相対履歴のアスペクト比依存性回帰結果

f	≦0.2	≦0.4	≦0.6	≦0.8	≦1.0	≦1.5
l1	0.002	0.030	0.043	0.075	0.080	0.116
r	0.196	0.187	0.166	0.234	0.332	0.330
m1	0.004	0.038	0.064	0.097	0.107	0.170
r	0.065	0.144	0.154	0.165	0.246	0.271

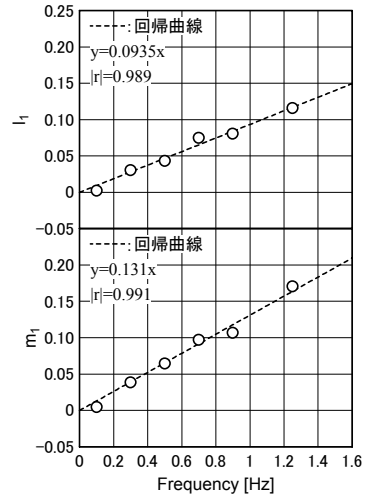


図-12 層間／相対履歴の振動数依存性

(3) 層間変位－荷重履歴への適用

振動数を6区分に分けた時の、アスペクト比と[層間変位の履歴におけるy切片荷重 $r_s Q_d$ ／相対変位の履歴におけるy切片荷重 $r_d Q_d$]、および[層間速度 $r_s V$ ／相対速度 $r V$]の関係、および式(26)、(27)による回帰結果を図-11、表-5に示す。また、6つに分けた振動数区分の中央値と回帰により得た l_1 、 m_1 の関係、および $l_1=l_2 \cdot f$ 、 $m_1=m_2 \cdot f$ による回帰結果を図-12に示す。使用データは、件名A～CおよびE～Wである。

バラツキは大きいですが、アスペクト比が大きくなると、 $r_s Q_d / r_d Q_d$ は小さく、 $r_s V / r V$ は大きくなるのが分かる。また、そのアスペクト比に対する勾配は、高振動数になるほど大きくなるのが分かる。

以上より式(31)、(32)を得る。式(31)、(32)を図-11に合わせて示す。

$$\beta = 1 - 0.0935fA \quad \text{※ } \beta \geq 0 \quad (31)$$

$$\gamma = 1 + 0.131fA \quad (32)$$

5. 2002式の整合性検証

制震壁の相対変位－荷重の履歴における設計減衰力 $r F_w$ は、式(1)～(4)、式(28)を用いて算出する。層間変位－荷重の履歴における設計減衰力 $r_s F_w$ は、層間速度を式(6)、式(32)により相対速度に変換して $r V_w$ を求め、式(5)、式(31)を用いて算出する。

(1) 全標本を用いた場合

a) 最大変位・速度の依存性

全標本において、最大変位・速度と $r Q_d / r F_w$ の関係を表したものを図-13に示す。 $r F_w$ 算出の際、 dy は実測値を

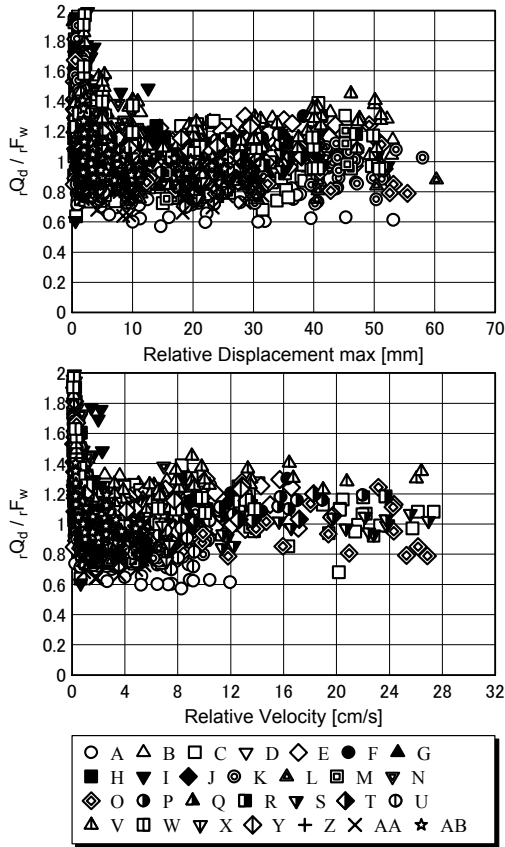


図-13 2002式の最大変位・速度に対する整合性

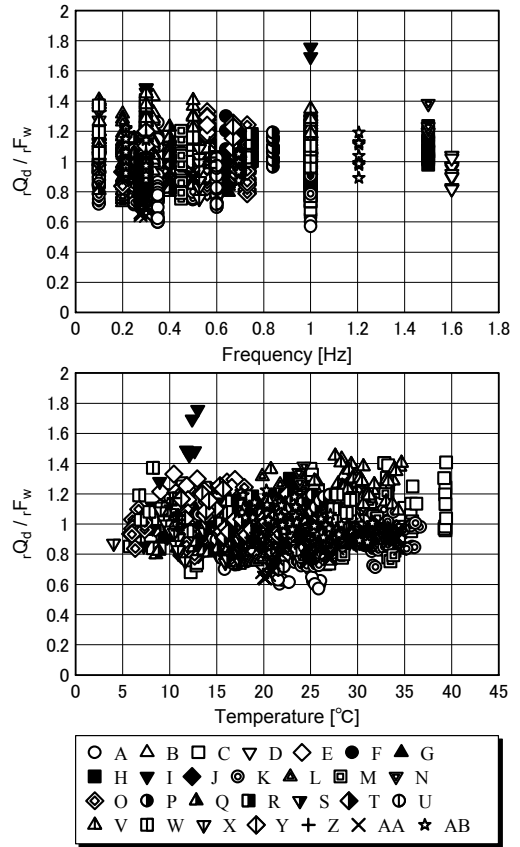


図-15 $V \geq 0.5 \text{ cm/s}$ かつ $D_{\text{max}} \geq 2.5 \text{ mm}$ における2002式の振動数・温度に対する整合性

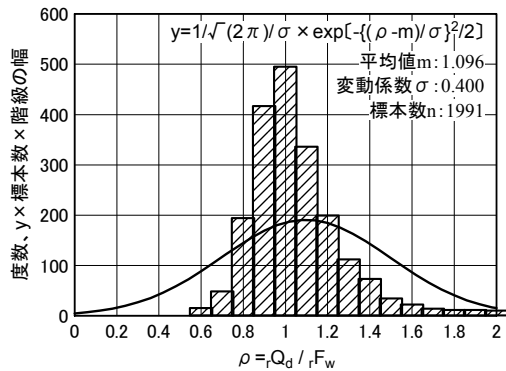


図-14 2002式に対する試験結果の度数分布

使用した。 r_{Q_d}/r_{F_w} は、微小変形・微小速度領域を除くと、バラツキはあるものの、最大変位・速度に対して傾きを持っておらず、2002式は、制震壁の粘性減衰力の最大変位・速度に対する依存性を、おおむね評価できていることが確認できる。

b) 全標本を用いた場合のバラツキ

全標本における、 r_{Q_d}/r_{F_w} の度数分布を図-14に示す。図中曲線は、正規分布の確率密度関数に標本数と階級の幅を掛けたもので、その面積はヒストグラムと同等になる。ヒストグラムは、1.0を最頻値とし、正規分布に従

っているかと思われたが、平均値 m が 1.096 と 1.0 より大きめに、変動係数 σ が 0.400 とバラツキが大きいことが確認された。これは、微小変形・微小速度領域の標本によるものと推測される。また、変動係数が 0.400 と大きな値を示したため、ヒストグラムは、曲線と異なった形状を示しており、 r_{Q_d}/r_{F_w} は、正規分布に従っていると言いが難いことが分かる。

(2) 微小変形・微小速度を除いた場合

a) 振動数・温度の依存性

$V \geq 0.5 \text{ cm/s}$ かつ $D_{\text{max}} \geq 2.5 \text{ mm}$ における、加振振動数・粘性体温度と r_{Q_d}/r_{F_w} の関係を表したものを図-15に示す。 r_{F_w} 算出の際、 dy は実測値を使用した。 r_{Q_d}/r_{F_w} は、バラツキはあるものの、振動数・温度に対して傾きを持っておらず、2002式は、制震壁の粘性減衰力の振動数・温度依存性を良く評価できていることが分かる。

b) 微小変形・微小速度を除いた場合のバラツキ

$V \geq 0.5 \text{ cm/s}$ かつ $D_{\text{max}} \geq 2.5 \text{ mm}$ における、 r_{Q_d}/r_{F_w} の度数分布を図-16に示す。微小変形・微小速度領域を除いたため、標本数は1473と減少したが、 r_{Q_d}/r_{F_w} は、平均値 m が 0.988 とほぼ 1.0 であり、変動係数 σ が 0.145 と小さな

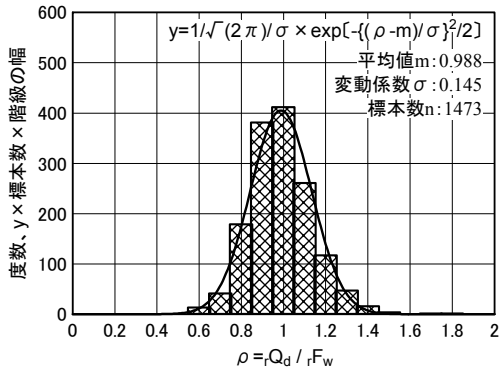


図-16 V ≥ 0.5cm/s かつ D_{max} ≥ 2.5mm における 2002 式に対する試験結果の度数分布

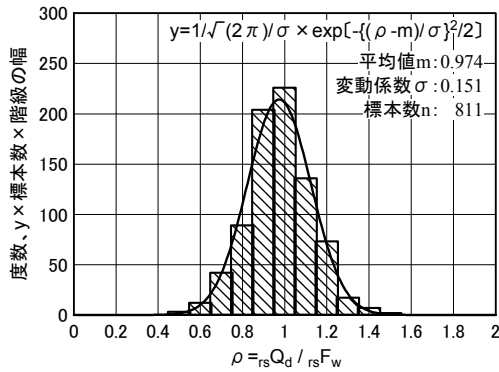


図-17 層間変位-荷重履歴の度数分布

表-6 2002 式の適用範囲

項目	適用範囲
設計隙間	$d_y = 5.0$ [mm]
速度	$0.5 \leq V \leq 20.0$ [cm/s]
最大変位	$2.5 \leq D_{max} \leq 40.0$ [mm]
振動数	$0.1 \leq f \leq 1.0$ [Hz]
温度	$10.0 \leq t \leq 35.0$ [°C]
アスペクト比	$0.5 \leq A \leq 2.0$

値となった。また、ヒストグラムは、曲線と良く似た形状を示しており、 rQ_d/rF_w は、正規分布に従っていることが分かる。

(3) 層間変位-荷重履歴への適用した場合

層間変位-荷重の履歴における、 $r_s Q_d/r_s F_w$ の度数分布を図-17に示す。過去の試験には、層間変位を収録していないものもあったため、標本数は、811と減少したが、 $r_s Q_d/r_s F_w$ は、平均値 m が 0.974、変動係数 σ が 0.151 であり、層間変位へ適用した場合においても、相対変位-荷重の履歴における場合とあまり変わらない値となった。また、ヒストグラムは、曲線と良く似た形状を示しており、 $r_s Q_d/r_s F_w$ は、正規分布に従っていることが分かる。

(4) 2002 式の適用範囲

本検証により得られた知見および、得られた標本の分布を基に、2002 式の適用範囲を表-6に示す。この適用範囲内であれば、制震壁の rQ_d/rF_w および $r_s Q_d/r_s F_w$ は、平均値がほぼ 1.0 であること、変動係数が 0.15 程度であること、正規分布に従っていることが推測される。

2002 式において、粘性体粘度の温度依存性は、 $f \approx 3.0\text{Hz}$ で温度勾配が逆転し右上がりとなる。これを解消することにより、さらに高振動数においても適用可能な式になると考えられる。

また、微小変形・微小速度は、2002 式の適用範囲外としているが、 rQ_d/rF_w は大きめの値をとっており、2002 式を適用することで、安全側の評価が得られると推測される。

6. まとめ

2002 式の作成および整合性の検証により、以下のことが判明した。

- ①2002 式は、制震壁の粘性減衰力の、最大振幅・速度・振動数・温度の依存性を良く評価している。
- ②適用範囲内における、2002 式的设计減衰力に対する制震壁の y 切片荷重は、平均値が約 1.0、変動係数が 0.15 程度であり、正規分布に従っていると言える。
- ③制震壁の層間変位と荷重の履歴における粘性減衰力は、アスペクト比を用いることで、簡易に評価することが可能である。

今後は、粘性減衰力に付加剛性も考慮した設計式を作成する所存である。

謝辞：

本稿作成に際し、免制震事業部および(株)免制震デバイスの皆様に多大な協力をいただきました。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮崎光生, 光阪勇治: 粘性制震壁による大減衰高層建築物-静岡メディアシティビル-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp1015-1018, 1992.8