

建築構造物の応答制御設計法に関する研究

— その1 制震壁の粘性減衰特性に関する調査研究 —

STUDIES ON RESPONSE CONTROL TECHNOLOGIES FOR BUILDING STRUCTURES

— Part 1 Performance Tests of the Viscous Damping Walls for Large Damping Structures —

有馬 文昭* 宮崎 光生** 小森 清司*** 高橋 和雄****

By Fumiaki ARIMA, Mitsuo MIYAZAKI, Kiyoshi KOMORI and Kazuo TAKAHASHI

The "Structural Response Control Technology" herein described is a new methodology which realizes structures having artificial large damping by the "Viscous Damping Wall (in brief VD-Wall)". The VD-Wall is a wall-shaped powerful passive energy dissipator consisting of a pair of vertical steel plates filled with high viscous fluid.

This part reports the results of performance tests using full scale VD-Walls conducted to grasp the damping characteristics of VD-Walls.

The following facts were revealed;

- 1) The viscous resistant force Q_w generated in the VD-Wall can be represented by the sum of damping force Q_d and restoring force Q_k ($Q_w = Q_d + Q_k$). The former Q_d is proportional to the velocity gradient (dV/dy) raised to the α power, the latter Q_k to the relative displacement (δ) raised to the $(1+\beta)$ power.
- 2) The value of exponent α is substantially constant regardless of the viscosity of fluid. And the value of β is also constant regardless of the viscosity.
- 3) The damping capability of the VD-Wall during out-plane deformation is virtually the same as one when it is not deformed.

1. はじめに

耐震設計思想の根底は、地震等の外部エネルギーをいかに吸収するかにあり、あるものは地震そのものに強固に耐えるもの、あるいは特定部材にエネルギーの集中を許容する方法など様々な形態をなして発展を遂げてきた。その方法は、構造部材自体の塑性変形による履歴エネルギーの吸収というアプローチが主流であったように思われる。

1970年代初期以降、耐震構造用のメカニカルなエネルギー吸収装置に関する研究成果が海外において精力的に発表されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ これらの研究への取り組みは、

- ① 構造部材の塑性変形に伴うエネルギー吸収能力は、地震の激しい繰り返し荷重下では高い信頼性・安定性を確保することはかなり困難である。
- ② 塑性変形能力を構造部材に要求する設計法は、使用材料・ディテイルや構造物の形状に制約を必要とする。
- ③ その解決には、エネルギー吸収を第一目的とする別途の要素を導入すること。

等、耐震設計法における問題点の認識と、その解決の方向性を示唆した高度な技術に基づいて始められたようである。一方、Dr. Yaoの構造工学上の安全性を求める新しいアプローチ法として提唱した『構造物の応答制御』(Structural Control)の概念は、それ以降の構造物の耐震設計の方向性に大きな影響を与えたものと

* 工修 住友建設(株)建築部建築開発課 (〒160 東京都新宿区荒木町13番地の4)
(長崎大学大学院学生 海洋生産科学研究科)

** 住友建設(株)建築部建築開発課 (〒160 東京都新宿区荒木町13番地の4)

*** 工博 長崎大学教授 (〒852 長崎市文教町1-14 長崎大学工学部)

**** 工博 長崎大学助教授 (〒852 長崎市文教町1-14 長崎大学工学部)

して評価できよう。6) 我国における殊に地震動をその対象とする制震構法に関する研究は、1924年の鬼頭健三郎の“建築物耐震装置”7) にはじまり、1950年代から1960年代の小堀博士らの非線形振動理論8)へと展開し、松下・和泉博士による吸収要素の実施例9)にみられるが、本格的なアプローチは近年の免震構法(Base Isolation)への取り組みを契機に、始まったばかりといえよう。

制震構法には、ある特性値を有する装置や構法による受動的な手法(Passive Control)と、地震入力や応答を感知し、これに応じて時々刻々と装置・構法の特長値を変化させて応答制御を行う能動的な手法(Active Control)の両者が考えられる。いずれにしろ、制震技術が実用的であるためには、シンプルな機構、作動の確実性、メンテナンスの容易さや耐久性・安全性および経済性等を満足することが必要であろう。この意味で、減衰装置一般には、なお改善の余地があることはいうまでもない。

本研究は、前者に属する1技術として、振動エネルギー吸収装置である『制震壁』を用いて大減衰構造物を実現し、地震応答を制御・抑制する技術に関するものである。『制震壁』とは、図-1に示すように、耐震壁と同様な外観を有した一対の内・外壁鋼板からなり、高粘性物質が充填された外壁鋼板内を内壁鋼板が移動することによって粘性抵抗力が発生する機構の粘性減衰壁(減衰装置)である。一般に、粘性物質からなる減衰装置の粘性抵抗力は、粘性物質の粘性係数(μ)、有効せん断面積(A)、鋼板間の速度勾配(dv/dy)および入力振動数(f)等、複雑な要因が複合化して発生するものと考えられる。

本論文では、制震壁の試験体(1/3縮小模型10体、実物大10体)の内、実物大試験体5体について、種々の条件下で面内動的加振を行い、その粘性減衰特性を定量的に評価するとともに、面外変形時における静的および動的特性を確認したものである。その結果、制震壁の粘性抵抗力は、面外変形時においても有効に発揮され、Kelvin-Voigtモデルによって表現することが可能である。しかしながら、その減衰項および復元項は、それぞれ内・外鋼板の速度勾配と相対変形に対して非線形の関係にある。また、両者の特性は、加振振動数に依存することが判明した。

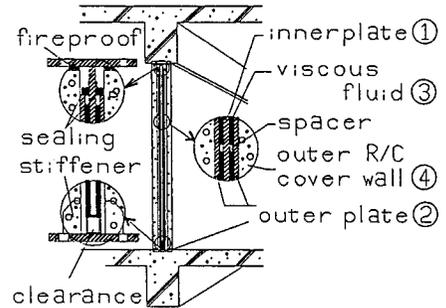


図-1 制震壁の構造

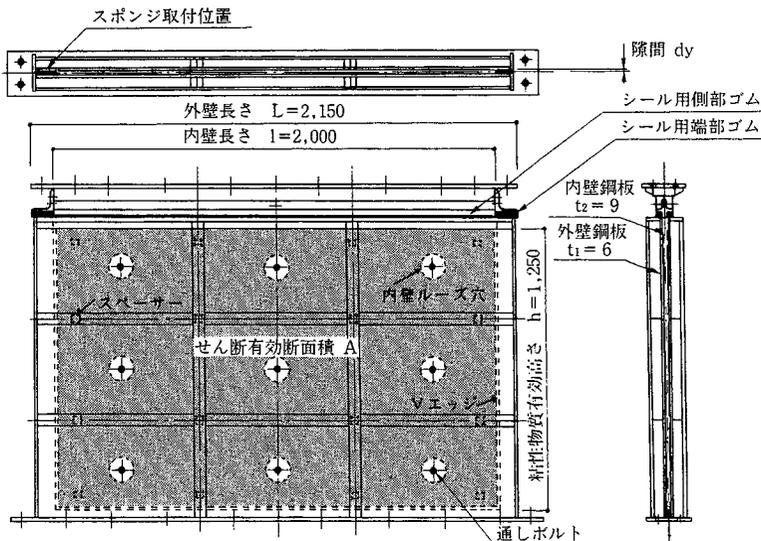


図-2 制震壁の形状および寸法(No.1~No.5)

表-1 試験体の種別

2. 実験概要

試験体 No.	1	2	3	5	6
粘性係数 μ (poise)	3,000	30,000	97,000	97,000	97,000
鋼板間隔 dy (cm)	1.0	1.0	0.7	1.0	1.0
せん断有効面積 A (cm ²)	23,750×2 公称: $\bar{A}=50,000$ (cm ²)				11,500×2 $\bar{A}=25,000$

2-1 試験体

図-2 に制震壁の代表的試験体の形状及び寸法を示す。

内壁鋼板上には、振動振幅と内・外壁間の所定の隙間を確保するために、それぞれ100φのルーズ穴とスペーサー（所定の隙間より1mm薄い）が取り付けられている。一方、外壁鋼板間は、面外へのふくらみを防ぐために、ルーズ穴間を貫通する通しボルトによって連結されている。また、内壁鋼板の端部は、振動時の粘性物質による反発力を消去するために、Vエッジとし、その先端はスポンジ材で満たされている。試験体は、有効せん断面積(A)、鋼板間隔(dy)、および使用粘性物質の粘性係数(μ)を変えることによって5体を製作した。表-1 に試験体の種別を示す。使用した粘性物質は① $\mu=3,000$ (poise)② $\mu=30,000$ (poise)および③ $\mu=97,000$ (poise)(いずれも $t=30^{\circ}\text{C}$ 時)の3種類のPoly-isobutyleneである。

2-2 実験方法

実験装置の概略を図-3, 4に示す。加振は、Dynamic Actuator($F=50tf$)による正弦波水平加振であり、加力水平梁によって内壁鋼板に伝達される。また、静的面外変形は反力フレームに設置した油圧ジャッキによって与えられる。この際、制震壁に生じる応力状態を実際状態に模倣させるために、内壁鋼板の回転を加力水平梁の上下に取り付けた面内方向回転自由のローラーにて拘束した。尚、実験開始に当たり、加力伝達梁のみで加振を行い、慣性力とローラーによる摩擦力の検出を試みたが、本実験に影響を及ぼす結果は得られなかった。

(1) 面外静的耐力試験

方向性のない地震動に対し、制震壁が面外変形を起こした場合が想定される。この場合、制震壁は、構造的に健全でかつ性能を保持していることが必要である。これらを確認するために、制震壁の頂部に面外力を加え、各部の変位、応力度を検出し抵抗メカニズムを明らかにする。静的面外力は、徐々にかつ連続的に与える。試験CASEは、層間変形角($R=\delta/h$)によって表-2のように分類した。

(2) 面内動的性能試験

制震壁の粘性減衰力は、内・外壁鋼板に生ずる速度勾配(dv/dy)の α 乗に比例するものと考えられる。したがって、動的加振は速度をパラメータとして最大速度 $V=0.2\sim 10$ (kine)の範囲で行った。また、粘性減衰力の振動数依存性を把握するために、異なる振動数の正弦波にて加振した。

以上の試験サイクルを、制震壁の面外変形角を変化させて行い、面外変形状態における制震壁の粘性減衰特性についても検討した。これらの実験種別の一覧を表-3に示す。

(3) 繰り返し耐久試験

制震壁の粘性減衰吸収エネルギーと粘性物質の温度上昇との関係を把握するために、動的繰り返し加振試験を行った。試験は、表-3のCASE6に示すように面外変形角 $R=0$ の状態にて正弦波の連続加振を行った。加振回数は約1,500回程度で、温度上昇や粘性抵抗力の収束状況を観察しながら決定した。

2-3 測定方法

計測状況と計測項目の一覧を、それぞれ図-5と表-4に示す。面内動的試験における測定は、所定の変

表-2 面外静的耐力実験の実験種別

CASE	1	2	3
変形角 R (rad)	1/300	1/150	1/100
水平変位 δ (mm)	5.0	10.0	15.0
制震壁の高さ h (mm)	1,500		

*) $R=\delta/h$

表-3 面内動的性能試験の実験種別

CASE	1	2	3	4	5	6
加振振動数 (Hz)	0.5	1.0	1.5	3.0	5.0	1.0
変形角 (rad)	0及び1/300~1/100					0
入力タイプ	一定最大速度0.2~10.0(kine)					6.0(kine)
加振時間 (s)	約10~20					約1500

表中の加振振動数は、入力正弦波の振動数を示す。

形および速度差のもとで数秒間（入力正弦波の周期の10倍程度）のデータをダイナミックデータレコーダにて収録して、以後の解析に用いた。基本的な検討項目は、・粘性減衰力と速度勾配の関係、・粘性減衰力と温度との関係、・制震壁による付加偶力の検出、・粘性抵抗力における復元特性の抽出、およびこれらの相互作用効果である。

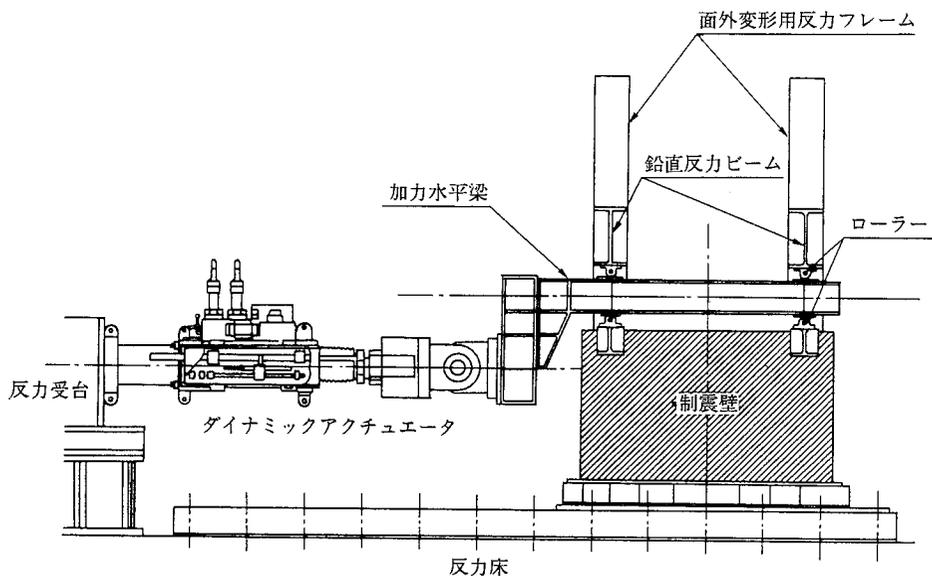


図-3 実験装置の概略（側面図）

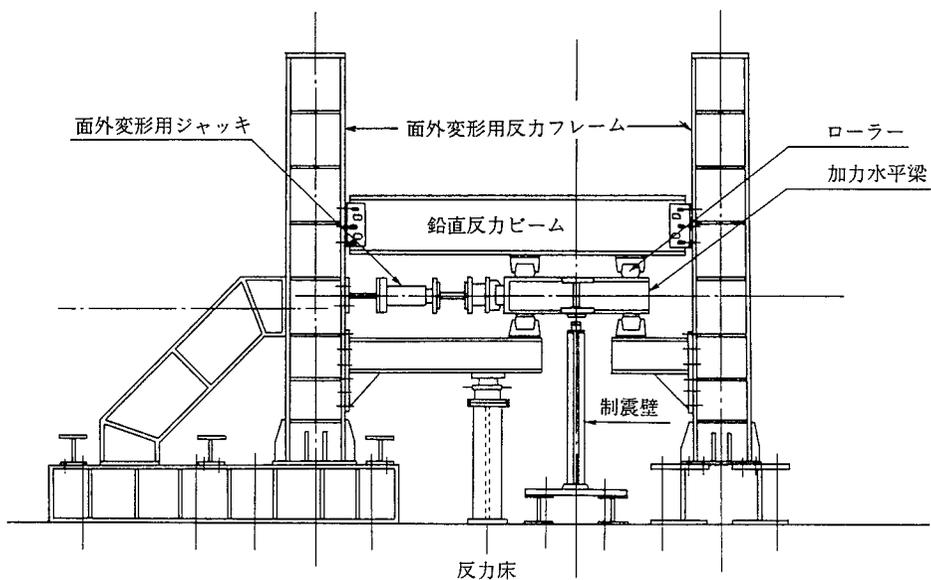


図-4 実験装置の概略（断面図）

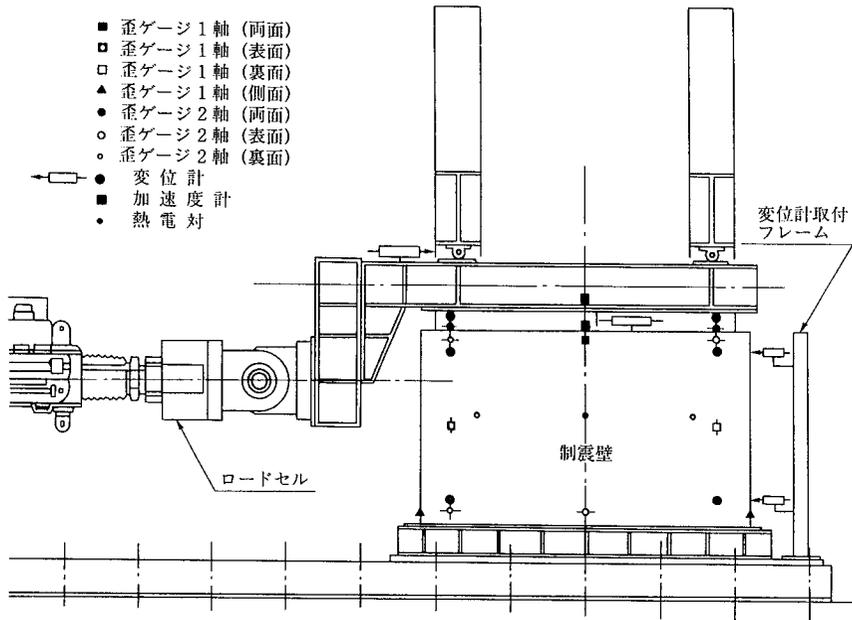


図-5 本実験における測定状況

3. 実験結果

3-1 面外静的耐力試験

制震壁に面外力を連続的に与えた場合の水平変位の推移を図-6に示す。制震壁の内・外鋼板は、基本的には、粘性物質を介しているため不連続体とみなすことができようが、内壁鋼板上のスペーサーが加力点となり、変形は初期の段階から共に進行する。面外方向の制震壁全体の剛性は、 $k_0 \approx 1.0 \text{ ton/cm}$ であり、この剛性はほぼ外壁鋼板のみの剛性に匹敵する。制震壁の面外力に対する抵抗メカニズムを図-7の解析モデルによって解明した。加力部はローラー支持、粘性物質は剛性の小さいばねとして節点に集中作用させ、外壁間は通しボルトで連結状態とした。図-8はその解析結果を示したものである。内壁鋼板に生ずる応力状態は、あたかも地盤の杭に酷似し、一方外壁鋼板は、通常の片持梁の応力状態にあるといえる。実際の応力度から換算すると、最も苛酷な内壁鋼板においても変形角 $R=1/100$ 時に応力度 $\sigma_{\max.} = 1.0 \text{ ton/cm}^2$ 程度であり許容応力度以下に納まり、構造的に健全であることが確認された。これらの一連の試験より、面外変形時の応力算定略算値を示したものが図-9である。この際、制震壁の面外剛性は外壁鋼板の剛性を用いれば十分であることも確認された。

3-2 面内動的性能試験

(1) 粘性抵抗力(Q_w)

制震壁の粘性抵抗力(Q_w)を決定する一つの要因は、粘性物質の粘性係数(μ)である。粘性係数は、粘性流体分子間の運動量交換に重要な役割を果たす係数であり、圧力(p)と温度(t)との関数である。¹⁰⁾ 特に高

表-4 測定項目の一覧

設置位置	計器	仕様	数量	測定内容
加力梁	変位計	100mm	1	入力変位
内壁鋼板	変位計	25mm	2	面外変位
	加速度計	1G	1	加振方向の加速度
	歪ゲージ	2軸	4	鋼板に生じる応力度
外壁鋼板	変位計	25mm	2	加振方向の絶対変位
	変位計	25mm	4	面外変位
	変位計	100mm	1	加振方向の内外壁の相対変位
	加速度計	1G	1	加振方向の加速度
	歪ゲージ	2軸	4	鋼板に生じる応力度
	"	1軸	6	"
	熱電対		4	粘性体の温度、外気温
アクチュエータ	ロードセル		1	入力荷重
面外変形用ジャッキ	ロードセル		2	面外方向荷重

圧でない限りでは圧力の影響はなく、温度のみの関数と考えてよい。粘性物質の温度依存性は次の関係式によって定まり、式中の係数は実験的に決定される。

$$\mu = c_1 \cdot e^{-bt} \quad [\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{cm}^2] \quad (1)$$

ここに、 c_1 ：粘性物質による比例定数

b ：温度勾配を示す係数（以後、『温度係数』と呼ぶ）

t ：温度（℃）

一方、『ニュートンの粘性法則』による粘性抗力（ Qd ：以後、『粘性減衰力』と呼ぶ）は、

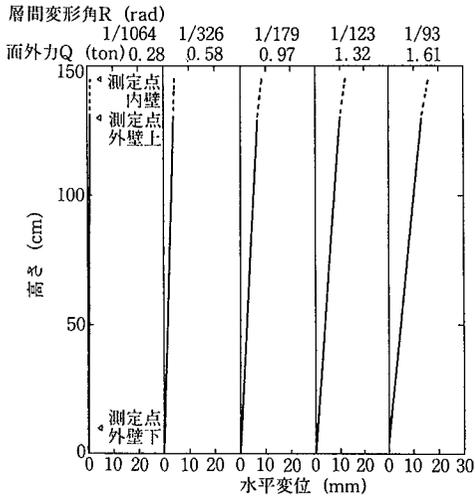


図-6 面外力を与えた制震壁の水平変位

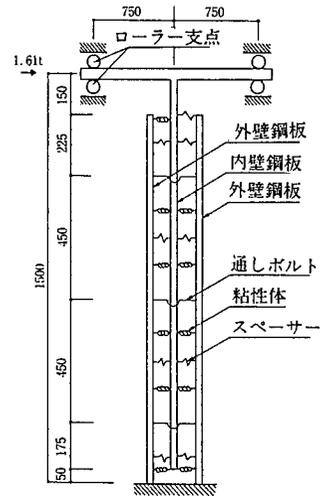


図-7 面外変形用解析モデル

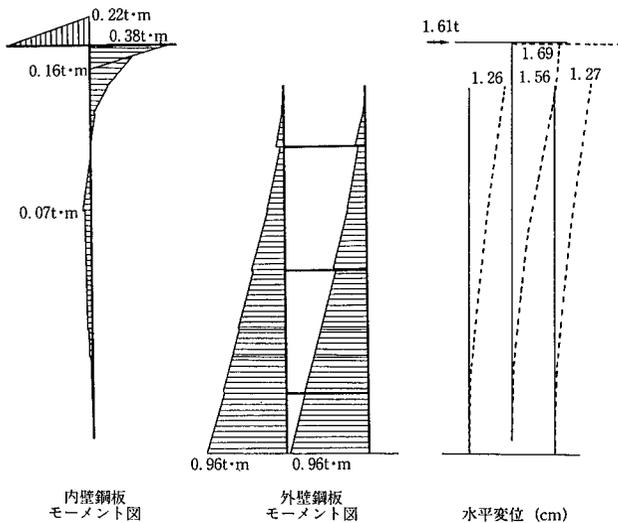


図-8 面外変形用解析結果

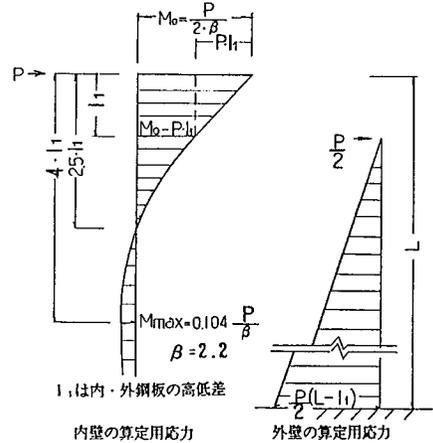


図-9 面外変形算定用応力

$$Q_d = a \cdot \mu \cdot A \cdot (dv/dy)^\alpha \quad (2)$$

ここに、 a ：比例定数（ f の依存項を含む）、 μ ：粘性物質の粘性係数 [kgf・s/cm²]
 A ：有効せん断面積 [cm²]
 dv/dy ：内・外鋼間板間の速度勾配 [sec⁻¹]
 α ：速度勾配に対する非線形乗数

図-10, 11の実線は、本実験における代表的な履歴ループである。上式の Q_d は、速度勾配が最大となる変位=0のときの最大値を示す。この粘性減衰力より、試験毎に（ $Q_d/\mu/A$ ）と（ dv/dy ）の関係から定数（ a ）と非線形乗数（ α ）が決定される。さらに、これらの係数と加振周波数（ f ）との関係を求めると、振動数依存性を考慮した係数が得られる。

図に観察されるように、粘性抵抗力には、粘性減衰力以外に剛性特性を有することが判る。この復元力（ Q_k ：以後、『粘性復元力』と呼ぶ）は、次式に示す関係にあると推定される。

$$\begin{aligned} Q_k &= \{c \cdot \mu \cdot A \cdot dv/dy^2\} \cdot \delta \text{ [kgf]} \quad (3) \\ &= \{k_w \cdot \delta^\beta\} \delta \\ &= K_w \cdot \delta \end{aligned}$$

ここに、 k_w ：制震壁の初期剛性、 K_w ：制震壁の付加剛性（非線形項）
 c ：比例定数（ f の依存項を含む）、 δ ：内・外鋼板の相対変位
 dv ：内・外鋼板の最大速度差、 dy ：内・外鋼板の隙間
 β ：速度勾配または変位に対する非線形乗数

粘性復元力 Q_k は、履歴ループの最大変形時の粘性抵抗力より上記と同様な手法によって算出され、付加剛性 K_w として評価される。この K_w は、 μ 、 A 、 dv/dy 、 dy の関数として捉えたものである。

結局、 Q_d と Q_k は、それぞれ速度勾配及び相対変位に対して非線形となり、両者の和が制震壁の粘性抵抗力（ Q_w ）となる。すなわち、

$$Q_w = Q_d + Q_k \quad (4)$$

したがって、励起振動が調和振動である場合には上式は、

$$\begin{aligned} Q_w &= C_w \cdot v^\alpha + K_w \cdot \delta \\ &= C_w (-a_1 \cdot \omega \cdot \cos \omega t)^\alpha + a_1 \cdot K_w \cdot \sin \omega t \end{aligned}$$

ここに、最大値： $Q_0 = a_1 \sqrt{(a_1^\alpha \cdot \omega^{2\alpha} \cdot C_w^2) + K_w^2}$

a_1 ：変位振幅、 ω ：加振円振動数

となる。図中の破線が(4)式によって求めたものであり、この実験式は実験値をかなりの精度で追従しており、十分実用的に粘性抵抗力を評価することが可能である。図-12, 13は、これらの特性値を分離抽出して示したもので、加振振動数に依存していることが観察できる。線中は、式(2),(3)の回帰式によるものである。温度を試験毎の平均温度を採用したため、速度勾配および変位が大きくなると誤差を生じるが、温度を逐次採用すると、より一層両者が一致することが推察できよう。尚、式(2),(3)の比例定数(a),(c)は、この振動数依存性を忠実に評価したものとなっている。

(2) 面外変形と粘性抵抗力

図-14~16に、各試験体における粘性減衰力（ Q_d ）と速度勾配（ dv/dy ）の関係を面外変形角の相違で比較して示した。図中の■印が面外変形角 $R=0$ 、○印が $R=1/100$ の場合の実験値である。図中の直線は試験時の平均温度における(2)式の回帰値である。一方、細い破線は、面外変形時の粘性減衰力を $R=0$ における平均温度に補正して求めたものである。これらの実験式は、ほぼ実験値を追従しているが、面外変形時の速度勾配の小さい領域では過小評価となる。限界性能における特性の大きな相違点は、(2)式における速度勾配の非線形乗数（ α ）の値が小さくなり、非線形の傾向がより一層顕著になっていることである。一方、図-17~21は、粘性復元力（ Q_k ）の面外変形による相違を示したもので、同様に面外変形角が大きくなると粘性復元力（ Q_k ）の相対変位（ δ ）に対する非線形性が強くなる。図-22および図-23は、これらの非線形乗数（ α ）、

(β)の面外変形角に対する関係を示したもので、両乗数は面外変形と線形的な関係を示す事が推定できる。

(3) 粘性減衰特性

図-24は、制震壁の粘性減衰性能を等価粘性減衰定数として示した1例である。一般に、相対変位が大きくなると減衰能力は高くなり、加振振動数や面外変形によってはあまり顕著な差は見られない。一方、制震

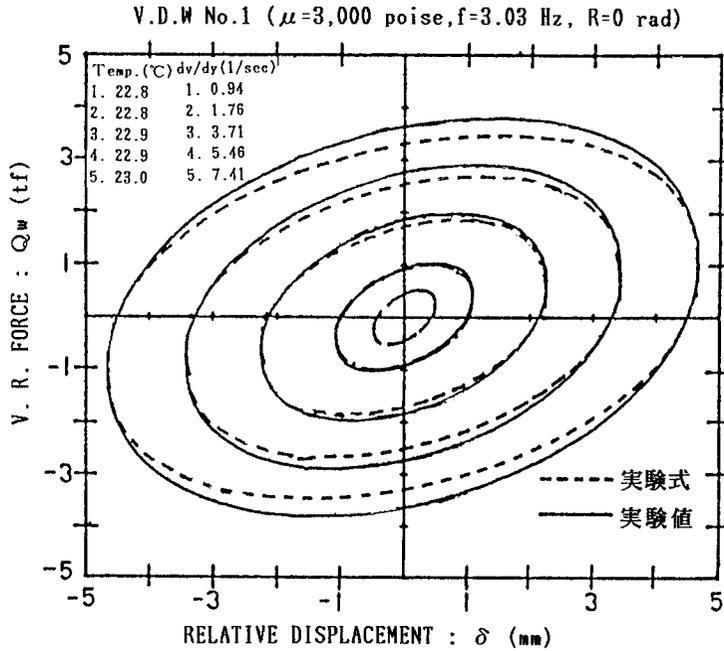


図-10 粘性抵抗力(Qw)の履歴ループの比較(No.1)

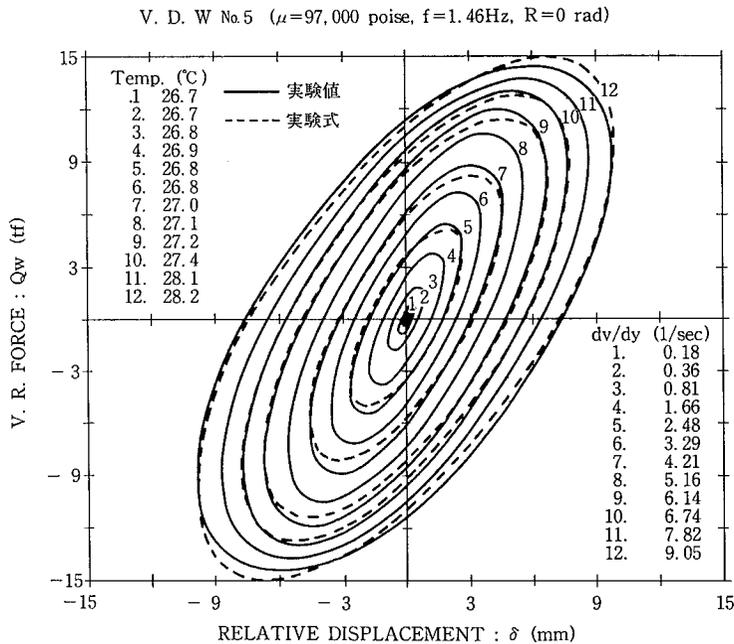


図-11 粘性抵抗力(Qw)の履歴ループの比較(No.5)

壁の1サイクル当たりの粘性減衰吸収エネルギーは、図-25に示すように相対変位とほぼべき乗の関係となる。この場合にも、微小変位領域において面外変形角による差は見られるが、概ね前述した傾向にあると言える。サイクル当たりの粘性減衰吸収エネルギーと相対変位との関係は、加振振動数および面外変形角を考慮しない場合に次式で与えられる。

$$E = C_2 \cdot \delta^\gamma \quad (6)$$

ここに、 C_2 : 比例係数

γ : 相対変位の非線形乗数

図中の直線は、全試験体の平均温度27°Cにおける回帰値である。式(6)における非線形乗数は、 $\gamma = 1.6 \sim 1.8$ となり、各試験体でほぼ一様な値を示す。一方、係数 C_2 は粘性物質の粘性係数が高く、有効せん断面積が大きい程大きな値となる。これらの結果より、制震壁の粘性減衰吸収エネルギーは、面外変形の有無にかかわらずほぼ同様な値となり、面外変形時においても所定の減衰能力を発揮することが確認された。

3-3 繰り返し耐久試験

図-26に、本実験におけるNo.5試験体の繰り返し加振回数と粘性物質の温度上昇との関係を示した。また、各試験体について温度と繰り返し加振回数の関係を求めて比較したものが図-27である。粘性物質の温度上昇は繰り返し回数とべき乗の関係にあり、粘性減衰能力の大なるもの程温度上昇率が大きい。即ち、粘性

係数が高く、また隙間が狭い程温度上昇の割合が大きくなる。図-28, 29に本実験における繰り返し回数100回毎の履歴曲線を示す。繰り返し加振回数の増加による影響として粘性抵抗力(荷重)および粘性減衰吸収エネルギーが減少し、平衡値に収束する傾向が見られる。この時の温度と粘性減衰吸収エネルギーとの関係を、図-30に示した。この関係は、温度(t)と粘性係数(μ)との関係と同様に与えられる。しかしながらこの回帰式における温度係数は、0.04~0.10となり、粘性係数(μ)の温度係数(約0.07)に比べて、ばらつきが生じる。これは、粘性物質の温度係数が0°C~100°Cのデータをもとに求められたものに対し、本実験データが狭い温度範囲に限られていることに起因する誤差と考えられる。

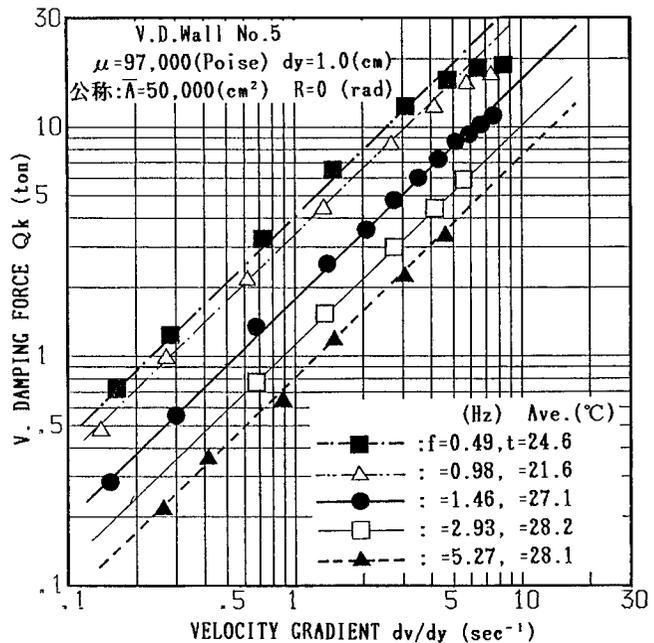


図-12 粘性減衰力(Qd)と速度勾配(dv/dy)との関係

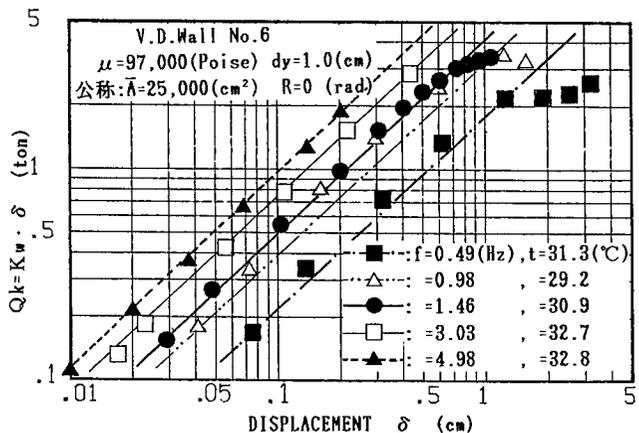


図-13 粘性復元力(Qk)と相対変位(delta)との関係

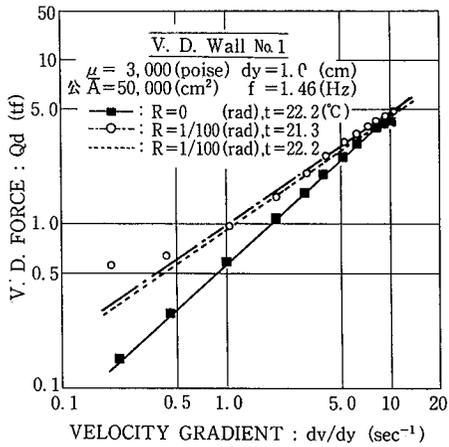


図-14 面外変形角の相違による粘性減衰力と速度勾配の関係 (No.1)

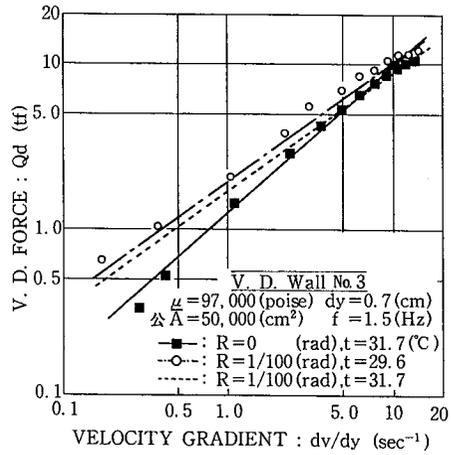


図-15 面外変形角の相違による粘性減衰力と速度勾配の関係 (No.3)

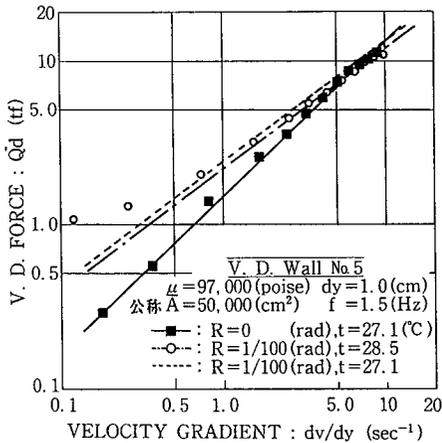


図-16 面外変形角の相違による粘性減衰力と速度勾配の関係 (No.5)

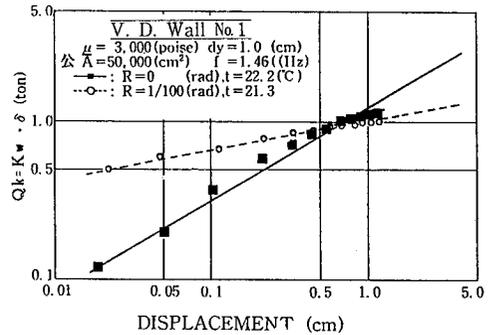


図-17 面外変形角の相違による粘性復元力と相対変位の関係 (No.1)

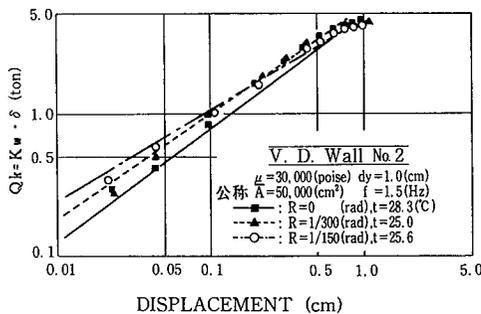


図-18 面外変形角の相違による粘性復元力と相対変位の関係 (No.2)

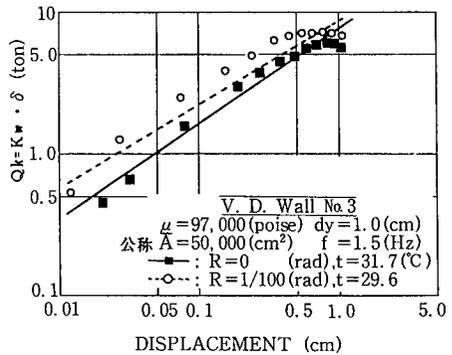


図-19 面外変形角の相違による粘性復元力と相対変位の関係 (No.3)

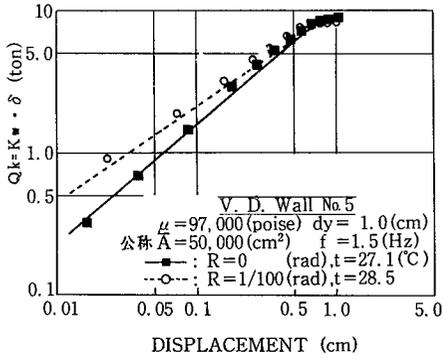


図-20 面外変形角の相違による粘性復元力と相対変位の関係 (No.5)

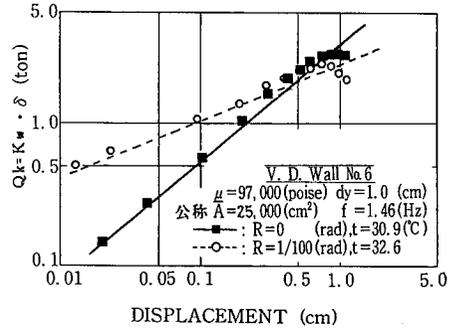


図-21 面外変形角の相違による粘性復元力と相対変位の関係 (No.6)

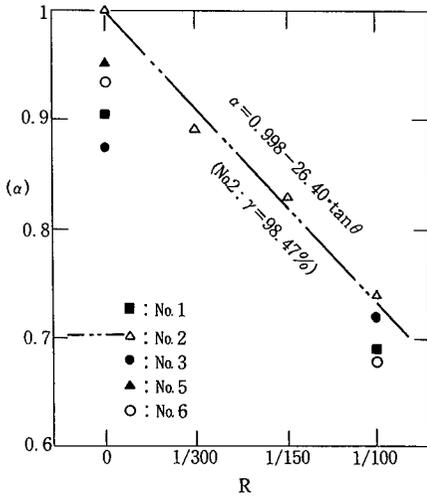


図-22 (Qd): 非線形乗数(α)と変形角(R)との関係

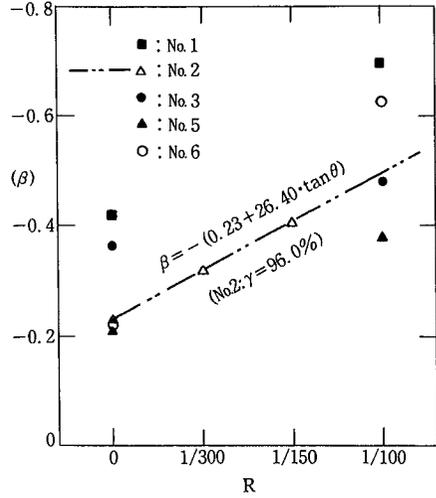


図-23 (Qk): 非線形乗数(β)と変形角(R)との関係

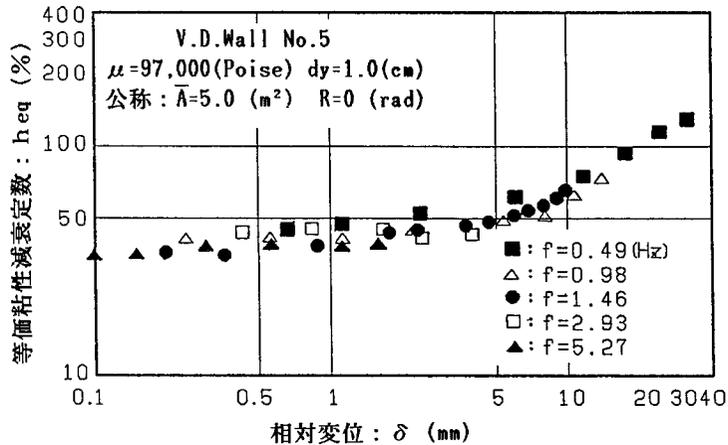


図-24 等価粘性減衰定数と相対変位との関係

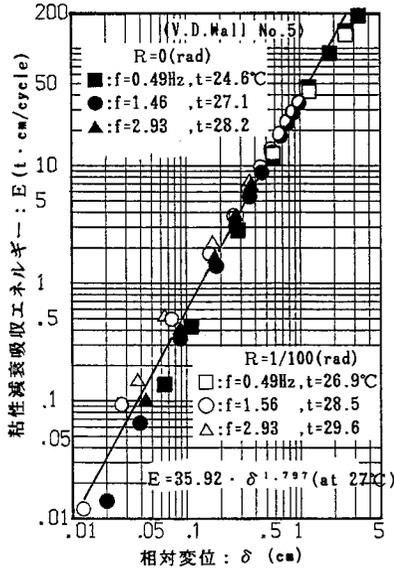


図-25 相対変位と粘性減衰吸収エネルギーとの関係 (No.5)

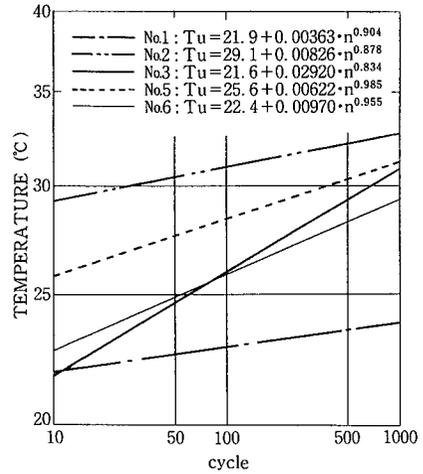


図-27 繰り返し加振回数と温度上昇の比較

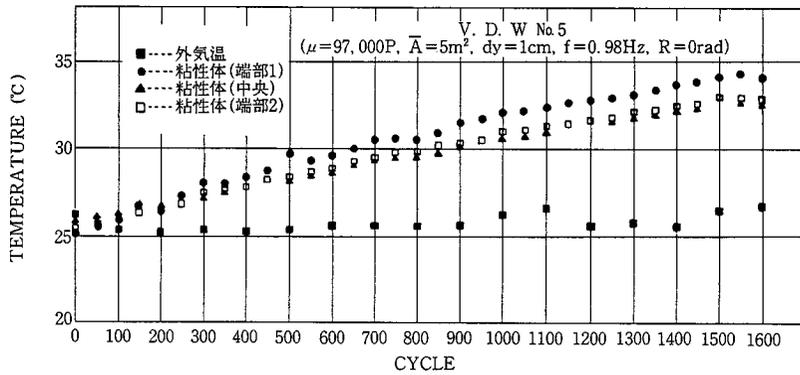


図-26 繰り返し加振回数と粘性物質の温度上昇の関係 (No.5)

4. おわりに

制震構造に関する技術として、これまでに提案されているものだけでも極めて多様である。制震構造に対する本格的な対応がこれから始まると考えると、制震構造技術の今後の展開がいかなる広がりを示すかは測り知れないものがあるといえよう。制震・免震構造にはまだまだ解決すべき課題も多いが、その技術に秘められた可能性は大きく、健全に発展させていくべき価値を有するものである。幸いにも、近年社会的関心が急速に高まりつつあることで、制震・免震構造技術が発展する社会的基盤が整いつつあるように思われる。

このような社会背景のもとに、「制震構造を構成する1技術」として、エネルギー吸収機構である『制震壁』の粘性減衰性能について種々の実験を行い、その有効性について言及してきた。本論文では、『制震壁』の基本的な性状を解明してきたが、以下に判明した事項を要約すると、

1) 制震壁に発生「粘性抵抗力(Q_w)」は、所謂「減衰力(Q_d)」のみならず「復元力(Q_k)」をも考慮しその両者の和をもって表され、「減衰力」は速度勾配(dv/dy)のα乗に、他方「復元力」は相対変位(δ)の(1+β)乗に比例する。

2) この粘性抵抗力には振動数依存性が認められ、高い励起振動数に対して「減衰力」は低下し、一方「復元力」は増大する傾向にある。

- 3) これらの振動数依存性を考慮した算定式は、本論で述べたように粘性抵抗力を概ね正しく評価できる。
- 4) 制震壁の減衰性能を等価粘性減衰定数で評価すると、 $h_{eq}=30\sim 200\%$ と大きくその値は相対変位の増大と共に増加する傾向にある。
- 5) 制震壁の面外変形に対する力学的抵抗メカニズムは、内壁鋼板は地盤内の杭に酷似した挙動を示し、また外壁鋼板では片持梁として扱われ、これらの算定式に従えば説明することができる。
- 6) 面外変形時の「粘性抵抗力」にあっては、変形角の増大に伴い「減衰力」及び「復元力」は非線形性が強くなるが、総合的な減衰性能は変形角=0の場合と大差なく発揮される。

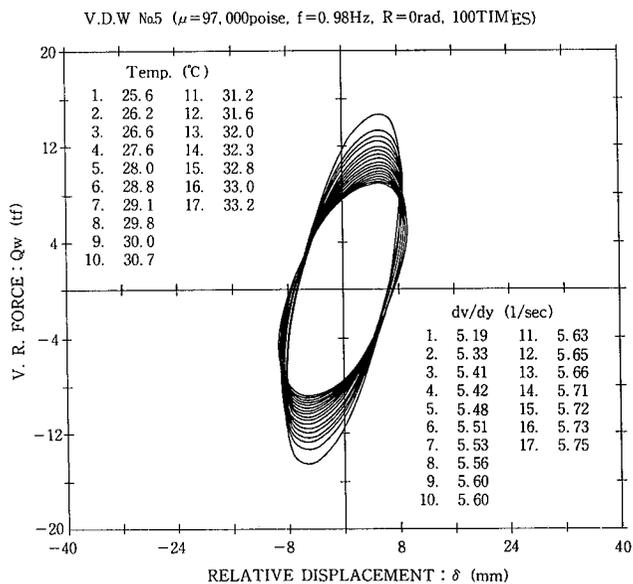


図-28 繰り返し加振時の履歴ループ(100回毎)(No.5)

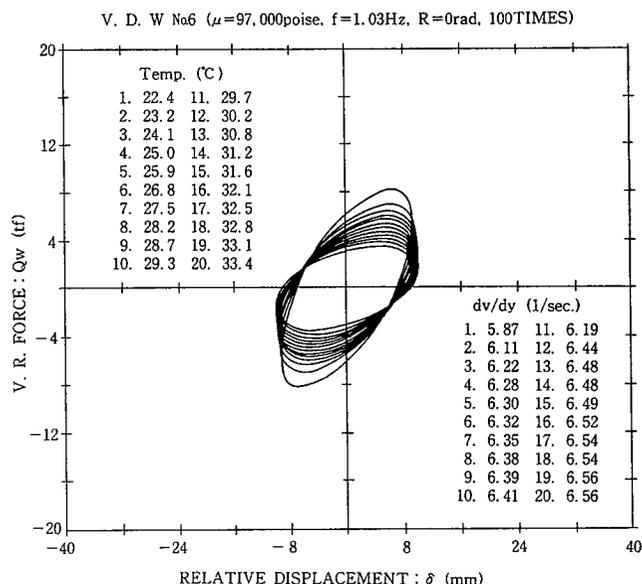


図-29 繰り返し加振時の履歴ループ(100回毎)(No.6)

7) 制震壁の繰り返し耐久試験より、粘性物質の温度上昇は繰り返し回数とべき乗の関係にあり、粘性減衰能力の大きなも程温度上昇率が大きい。すなわち、粘性係数が高く隙間が狭い程、上昇率は大きい。

9) 繰り返しによる粘性減衰吸収エネルギーの低下率は、粘性係数の温度上昇による低下率とはほぼ一致する。となる。

本装置も含めて、減衰装置一般には性能、信頼性、耐久性、コスト、メンテナンスの面から、なお改善の余地があることは言うまでもない。今後、制震・免震構造に於ける幾多の地震による実証データの蓄積と設計法の合理化が進められ、個々の技術が進展することはもとより、制震構造・免震構造に関する研究開発と実用化がより進展することを願うものである。

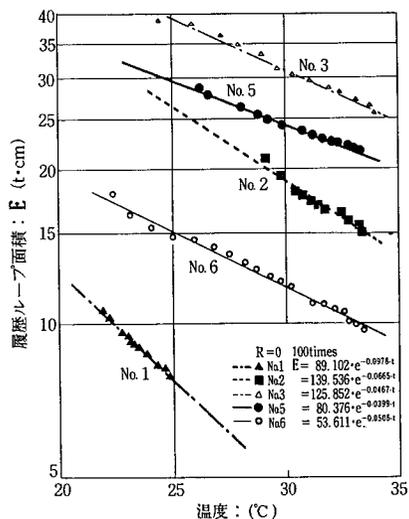


図-30 温度と履歴ループ面積との関係

謝辞

本実験は社団法人建築研究振興協会への依託実験であり、遂行に当たり、山崎裕博士、上之園隆志主任研究員並びに加藤博人研究員(建設省建築研究所)に御指導を頂いたことを記し、ここに深く謝意を表します。

〔参考文献〕

- 1) J.M.Kelly,R.I.Skinner and A.J.Heine, "Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for use in Earthquake Resistant Structures" ,Bulletin of N.Z. National Society for Earthquake Engineering,Vol.5,No.3,1972.
- 2) R.W.G.Blakeley et al, "Recommendation for the Design and Construction of Base Isolated Structures" ,Bull.of the N.Z. N.S.E.E,Vol.12,No.2,June,1979
- 3) J.N. Yang, "Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures" , ASCE,Vol.101 EM6 Dec.1975
- 4) J.N. Yang and F.Giannopoulos, "Active Tendon Control of Structures" , ASCE Vol.104 EM3 June 1978,etc.
- 5) Mohamed Abdel-Rohman & Horst H.Leipholz, "Active Control of Flexible Structures" ASCE,Vol.104,ST8,Aug,1978
- 6) James T.P.Yao, "Concept of Structural Control" ,ASCE,Vol 98,ST7,July,1971
- 7) 鬼頭健三郎：建築物耐震装置，特許No.61135号，1924
- 8) 小掘銚二：「制震構造に関する一つの試み」，日本建築学会研究報告41号，1957年，他多数
- 9) 和泉正哲：「幾つかの試みを通しての所感」，Structure,20号,pp.25-28,1986.10
- 10) 生井武文，井上雅弘：「粘性流体の力学」，理工学社