

増幅機構付き減衰装置の動的高速試験

Dynamic High Speed Testing of the Damping Devices with an Amplification Mechanism

中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

鈴木 亨 TORU SUZUKI

免制震事業部 古橋 剛 TAKESHI FURUHASHI

免制震事業部 光阪 勇治 YUJI MITSUSAKA

(株)免制震デバイス 田中 久也 HISAYA TANAKA

増幅機構付き減衰装置「減衰こま」は、直線運動を回転運動に変換する機構を持ち、制震装置や免震用の減衰装置として用いられている。これまで、最大速度 0.75m/s までの性能検証がなされているが、想定以上の地震動に対しては、必ずしも十分な確認がなされているとは言えない。筆者らは、本装置の限界性能を検証するため、最大速度 1.5m/s の動的加振試験を行い、減衰装置として高い性能を保有していることを確認した。また、高速度領域における粘性抵抗力の特性について明らかにするとともにその要因に関する考察を行った。
キーワード：減衰装置，増幅機構，高速試験，シリコンオイル

Rotary damping tubes “RDT” have the mechanism in which straight-line motions of the shafts are converted to rotational movements of the tubes which contain silicone oil as damping material, and are used as seismic dampers and dampers for base isolation system. Although the performances of energy absorption of RDT had been verified up to the rage of 0.75m/s, the performances over the rage of 0.75m/s where the extreme earthquakes are assumed have been not necessarily verified yet. In order to verify the limit performances of these devices, the dynamic tests in maximum speed of 1.5m/s were carried out. The test results showed high performances of RDT as dampers. And the characteristics of viscous damping at high-speed rage were clarified, and the factors which influences on the viscous damping are also discussed.

Key Words: Damping Devices, Amplification Mechanism , High Speed Testing, Silicone oil

1. はじめに

増幅機構付き減衰装置「減衰こま」¹⁾ (Rotary Damping Tube=RDT) は、直線運動を回転運動に変換する機構を持ち、制震および免震用の減衰装置として建物や鉄塔等の振動制御に用いられている。これまで、本装置の性能は、最大速度 0.75m/s まで実証²⁾されており、この領域までにおける評価式³⁾の妥当性が確認⁴⁾されている。しかし、近年の地震観測網の整備に伴い、設計で想定されている以上の大きな地震動が観測されつつある。このような地震動に対しては、建物がより大きな応答を示すことが予想されるため、これまでの実証では、必ずしも十分な確認がなされているとは言えない。また、国内外においても大型装置における 1.0m/s を超える性能確認試験は、殆ど実施されていないのが現状である。

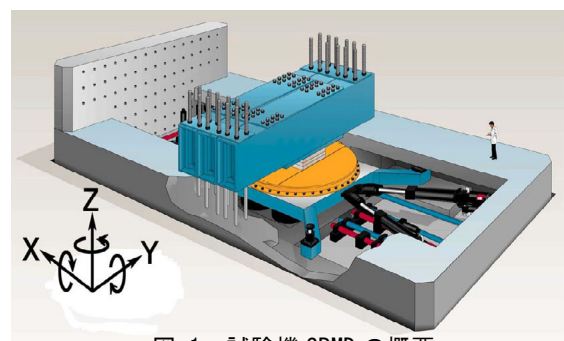


図-1 試験機 SRMD の概要

筆者らは、本装置の適用限界速度の拡大と、限界性能を検証するため、最大速度 1.5m/s における動的試験を行った。また、高速度領域に見られる粘性抵抗力の特性について明らかにするとともに、その要因に関する考察を行った。

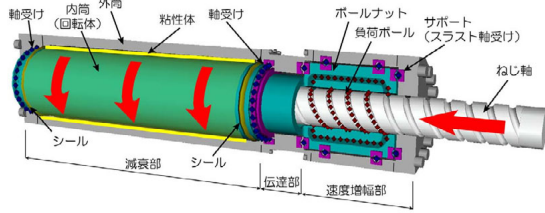


図-2 RDTの増幅メカニズム

表-1 試験体の諸元

| 諸元 | 記号 | 単位 | 免震用 | 制震用 | 検証用 |
|-------|--------|-----|-------|---------|---------|
| 増幅部 | ボールねじ径 | DB | φ 120 | 120 | 20 |
| | リード | Ld | 60 | 25 | 20 |
| 減衰部 | 外筒外径 | Do | φ 320 | 295 | 98 |
| | 内筒外径 | Di | φ 230 | 216 | 58 |
| | 有効長 | Le | 1340 | 1494 | 130 |
| | 隙間 | dy | 3.0 | 3.0 | 2.5 |
| | 増幅比 | S | 12.0 | 27.1 | 9.1 |
| | 粘度 | μ25 | cSt | 300,000 | 100,000 |
| ストローク | ST | mm | ±750 | ±100 | ±750 |
| 全長 | L | mm | 2,956 | 2,634 | 1,128 |

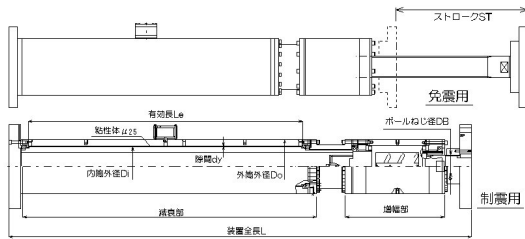


図-3 試験体の外観

2. 試験機概要

本試験は、UCSD（米国カリフォルニア大学サンディエゴ校）内にある世界最大級の振動台 SRMD(Seismic Response Modification Device)を使用して行った。SRMD（図-1）は、カリフォルニア運輸省、UCSD 他により共同開発された振動台であり、4基の水平ダイナミックアクチュエータ(以下、ACT.という)と4基の鉛直ベアリング ACT.および4基のアウトリガーACT.、反力壁、反力フレームにより構成され、6軸の自由度を有する。水平方向の最大加振力は 8, 900kN, 最大速度は 1.8m/s, 最大ストロークは 1, 220mm である。

3. 試験体概要

RDT の増幅メカニズムを図-2 に示す。RDT は、産業機械駆動部分として広く普及しているボールねじを速度増幅部（運動変換機構）に、粘性体（ジメチルシリコンオイル）が充填された回転部分を減衰部に構成した装置である。ねじ軸に作用する直線運動はボールナットにより回転運動に変換され、その運動は、ボールナットと連結した内筒に伝達され、固定された外筒との間で粘

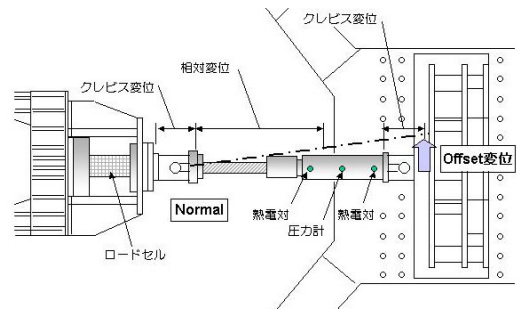


図-4 試験体の取付概要・計測点

表-2 試験パラメータ

| TEST ID | 装置種別 | 速度 m/sec | 変位 cm | 振動数 Hz | 定常 サイクル数 | 試験種別 | オフセット 変位(cm) |
|---------|------|----------|-------|--------|----------|--------|--------------|
| #1 | 免震用 | 0.4 | 25 | 0.25 | 2 | Normal | 0 |
| #2 | | 0.6 | 40 | 0.24 | 2 | | |
| #3 | | 0.8 | 50 | 0.25 | 2 | | |
| #4 | | 1 | 60 | 0.27 | 2 | | |
| #5 | | 1.2 | 75 | 0.25 | 2 | | |
| #6 | | 1.5 | 75 | 0.32 | 1 | | |
| #7 | | 0.4 | 25 | 0.25 | 2 | | |
| #8 | | 0.6 | 40 | 0.24 | 2 | | |
| #9 | | 0.8 | 50 | 0.25 | 2 | | |
| #10 | 制震用 | 0.3 | 10 | 0.48 | 2 | Normal | 0 |
| #11 | | 0.4 | 10 | 0.64 | 2 | | |
| #12 | | 0.5 | 10 | 0.80 | 2 | | |
| #13 | | 0.3 | 10 | 0.48 | 2 | | |
| #14 | | 0.4 | 10 | 0.64 | 2 | | |
| #13 | | | | | | Offset | 4 |

性抵抗力を得る。粘性抵抗力は、再び軸方向力に変換され、エネルギー吸収機構として作用するものである。

試験体の諸元を表-1 に、外観を図-3 に示す。試験体数は、免震および制震用の各1体である。免震用はストローク±750mm, 粘性体粘度 30 万 cSt, 増幅率 12.0 倍である。制震用はストローク±100mm, 粘度 10 万 cSt, 増幅率 27.1 倍である。免震および制震用の減衰部でのせん断歪速度は、4,516~6,040sec⁻¹ となり、粘性制震壁等の一般的な減衰装置に比べて数百倍となる。

4. 試験概要

試験体の取付概要を図-4 に示す。振動台上に固定した反力ブロックと反力壁間に2軸クレビス（軸周りの回転を拘束しながら他の2方向の回転を許容するクレビス）を介して RDT を取り付け、変位制御による軸方向の動的加振を行った。試験パラメータを表-2 に示す。免震用では、免震周期3~4秒を想定し、最大速度 0.4~1.5m/s の6ケース、制震用では、最大変位 100mm に対して最大速度が 0.3~0.5m/s の3ケースの入力を行った。また、両試験体とも2軸クレビスの追従性を確認するため、面内方向に RDT の一端をオフセットした状態での加振を行った。入力波は、漸増漸減正弦波とし、初めの1サイクルで所定最大速度に達し、2サイクルの定常入力の後、1サイクルで漸減することとした。なお、試験#6 の加振試験は、試験機の連続加振能力により、定常波を1サイクルとした。加振間隔は、試験機のアクチュエータチャージ時間を利用して加振前後の粘性体温度、圧力状況を把握することとし、20分間隔とした。

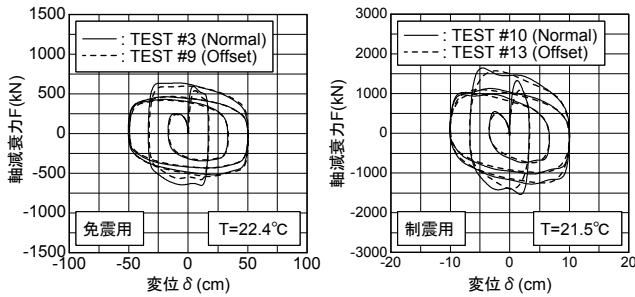


図-5 オフセット有り無しのF-δ関係の比較

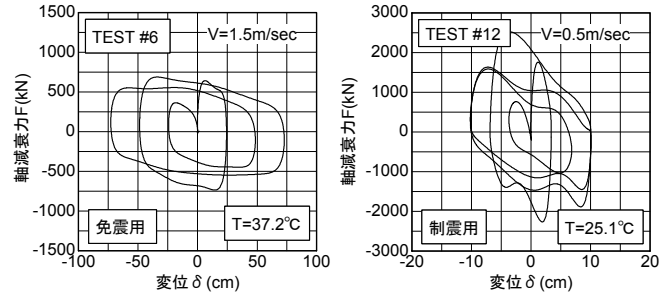


図-8 加振最大速度時の軸減衰力F-変位δ関係

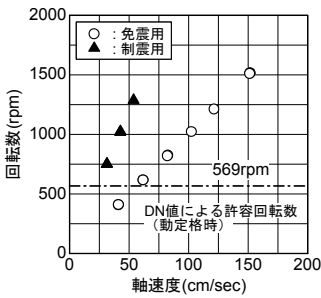


図-6 回転数-軸速度関係

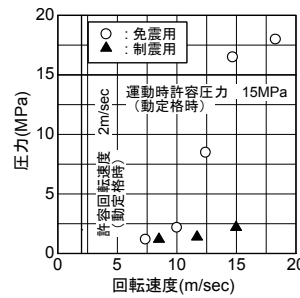


図-7 内筒の回転速度と圧力関係

表-3 慣性力に関する諸元

| 諸元 | 記号 | 単位 | 免震用 | 制震用 |
|---------|----|-------------------------|-------|-------|
| 内筒外径 | D2 | cm | 21.6 | 23 |
| 内筒内径 | D1 | cm | 14.91 | 15.2 |
| リード | Ld | cm | 6.0 | 2.5 |
| 回転体質量 | W | kg・sec ² /cm | 0.320 | 0.321 |
| 慣性モーメント | I | kg・cm・sec ² | 27.6 | 30.5 |

慣性力 $Q_i = I \times \left(\frac{2\pi}{L_d}\right)^2 \times A_n$
 ここに、 $I = \frac{W}{8} \cdot (D_2^2 + D_1^2)$ A_n : 軸方向加速度

5. 試験結果

(1) 装置を構成する要素の耐力

a) 増幅部

増幅機構として使用されているボールねじは、本装置の軸減衰力を伝達する重要な要素であり、実際の取付を考慮した装置の動作性および高速回転時のねじ軸の挙動を確認することは重要である。オフセット有り無し(Normal 試験)時の軸減衰力-変位(F-δ)関係の比較を図-5に示す。図中の温度 T は、試験前後の粘性体温度の平均値である。免震用で 0.2m(1/20rad.)、制震用で 0.04m(1/96rad.)の偏心加力時においても装置の動作性に問題はなく、Normal 試験とほぼ同様の性能を発揮した。内筒の回転数と軸速度の関係を図-6に示す。動定格の考え方に基づく加振最高速度時の許容回転数(DN値⁵⁾)は、免震用で 1,516rpm であったが、ボールねじおよびスラスト軸受け(ナットの回転を生じさせる軸方向負荷を外筒に伝達させる機構)ともに安定した挙動を示していた。

b) 減衰部

粘性抵抗を発生させる減衰部は、内筒が高速回転しているため、高速回転下における粘性体の液漏れを防止するシール材は欠かせない。内筒の回転速度と圧力の関係を図-7に示す。回転速度の最高値は、免震用で 18m/s、最高圧力は 18Mpa であり、圧力 P[kgf/cm²]×圧力 P[kgf/cm²]×回転速度 V[m/s]値に換算すると 3,240 であったが、液漏れやシール材の破損は見られなかった。また、内筒と外筒位置を確保する機構であるラ

ジアル軸受けに関しても異常は見られなかった。

このように装置を構成する各要素が、動定格における機械製品の許容値を超えて安定した挙動を示しているのは、長時間連続的に使用する機械製品と地震のように短期的に使用する減衰装置の考え方の違いであり、短期的に使用する場合は問題ない設定であることを確認した。

(2) 減衰性能

a) 慣性力

各装置の加振最大速度時の F-δ 関係を図-8に示す。回転するナットや内筒の質量による回転慣性の影響により、履歴が左肩上がりになっている。慣性力の大きい制震用では、履歴に波打つ部分が見られる。入力される加速度波形の影響によっては、履歴ループにその影響が現れる可能性がある。慣性力に関する諸元を表-3に示す。装置の相対変位の2階微分である加速度から算定した最大慣性力は、免震で 89kN、制震用で 477kN であった。ここで、時刻歴において全軸減衰力から慣性力の影響を差し引くと、図-9に示すような傾きのない楕円形の履歴となる。なお、慣性力は取付部材の強度設計の際には注意が必要であるが、ボールナットや内筒の回転質量程度では建物の応答へ及ぼす影響は殆どないと考えられる。

b) 粘性抵抗力の挙動

図-9 下段の慣性力を差し引いた軸速度と軸減衰力関係(F-V)において、直線的に挙動する領域と履歴を描いて挙動する領域がある。その挙動は、初期時には外側の大きなスケルトン上(A→B)を動くが、あるせん断応力(τ)またはせん断歪速度(Vs)(図-10に定義)を経験すると

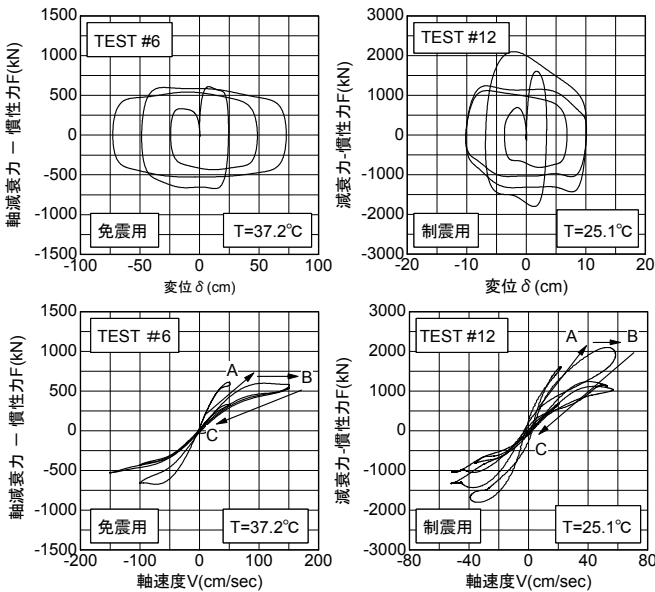


図-9 慣性力を差し引いた減衰性能

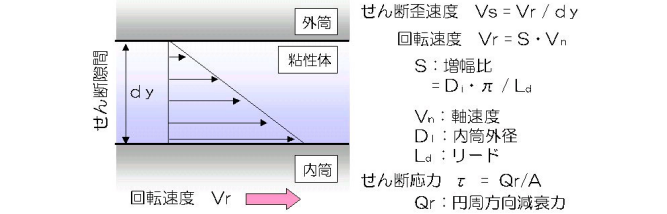


図-10 せん断応力 τ とせん断歪速度 V_s の定義

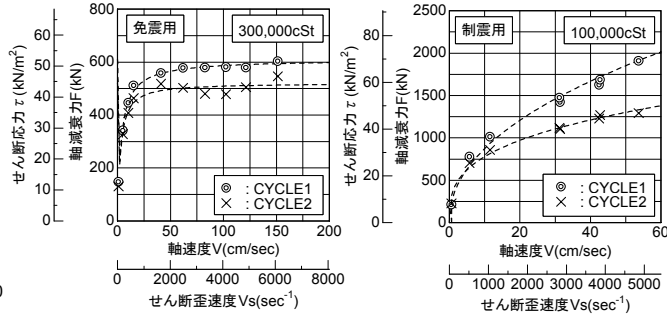


図-11 定常1・2サイクルの τ の差異

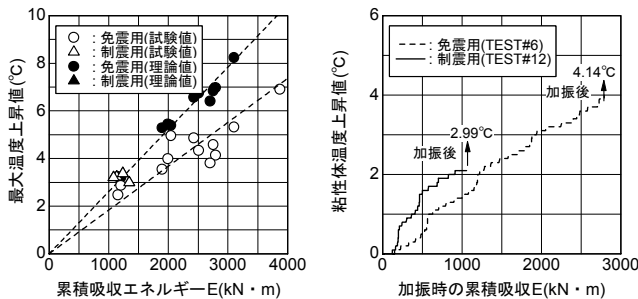


図-12 最大温度上昇値と吸収 E 図-13 吸収 E と温度上昇値

表-4 材料諸元

| 諸元 | 外筒 | 内筒 | 粘性体 | 単位 |
|---------------|------|--------|--------|-----------------|
| 材料 | 鉄 | 鉄 | シリコン | |
| 比熱 s | 486 | 486 | 1486 | J / (kg·K) |
| 比重 | 7.85 | 7.85 | 0.978 | |
| 熱伝導率 | 83.5 | 83.5 | 0.159 | W / (m·K) |
| 容積 | 免震用 | 49153 | 31358 | cm ³ |
| | 制震用 | 44285 | 28660 | |
| 質量 m | 免震用 | 386 | 246 | kg |
| | 制震用 | 348 | 225 | |
| 質量×比熱 [m × s] | 免震用 | 168951 | 119635 | J / K |
| | 制震用 | 168951 | 109341 | |

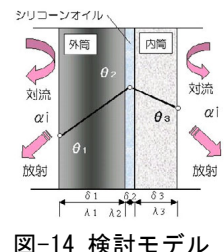


図-14 検討モデル

内側のスケルトン(B→C)に移行している。ここで、ある応力を経験する前の荷重と、経験後の荷重では大きな差異が生じているのが分かる。これらの差異が工学上無視できない領域を把握するため、図-11 の τ - V_s 関係上において、定常1・2サイクル目の τ の差異を見た。免震および制震用とも $750 \sim 1,000 \text{sec}^{-1}$ 付近で応力の差異が見られ始めており、その時の τ は免震用で $40 \sim 45 \text{kN/m}^2$ 、制震用 $30 \sim 35 \text{kN/m}^2$ 付近であった。この応力経験後の τ は、初期応力の7~8割程度となっている。

(3) 吸収エネルギーと温度上昇の関係

加振間隔 20 分間を含む粘性体の最大温度上昇値と累積吸収エネルギー(E)との関係を図-12 に示す。これらの関係はほぼ線形的であり、 $3,874 \text{kN} \cdot \text{m}$ で 6.9°C (#5)であった。温度上昇は、図-13 に示すように加振中の E の増加とともに上昇している。加振後の温度上昇の時間遅れは $0.2 \sim 0.8^\circ\text{C}$ 程度であり、その後は一定温度に落ち着いていた。表-4 に示す材料諸元と、図-14 のモデルにより得られる理論値/試験値は $0.94 \sim 1.68$ (図-12) であり、モデルの諸条件より、温度上昇は、粘性体と鉄の質量×比熱の比率関係が大きく関係していることが分

かる。本装置の場合、この比率が $1/62 \sim 1/67$ と鉄の占める割合が大きいため、温度上昇が小さいと考えられる。

6. 粘性抵抗力の挙動に関する考察

(1) 粘性体の特性

前述の F-V 上の粘性抵抗力の挙動の要因を把握するため、粘性体の構造・材料特性および粘度の低下メカニズムに着目した。

シリコンオイルは、ジメチルポリシロキサン構造(図-15)をもつ合成油で、珪素(-Si-O-Si-)の分子構造を主鎖とした1本の鎖状高分子である。UCSD 試験結果から得られる V_s - τ 関係を図-16 に、粘度と V_s 関係を図-17 に示す。 τ - V_s 関係で下に凸であるチクソトロピー的挙動^⑥および V_s の増加に伴う粘度の低下が見られている。この傾向にある高分子溶液の場合、図-18 に示す模式図^⑥でその現象を説明することができる。すなわち、減衰部の回転により τ が作用すると、分子間的高分子鎖の絡み合いが次第にほぐれて、粒子間の相互作用が急速に弱まるという現象である。このため一時的に見掛けの粘度は低下するが、分子構造自体の破壊現象ではないので、応力が作用しなくなると次第に元の状態に戻る。その特性は分子鎖の平均長さの長い高粘度の方が強い傾

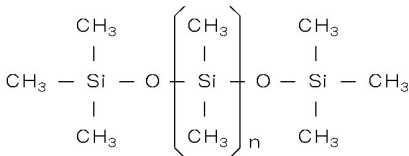


図-15 シリコンオイルの化学構造

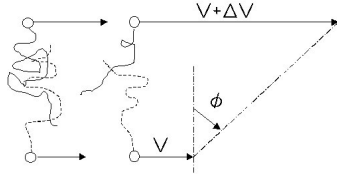


図-18 高分子鎖の絡み合い

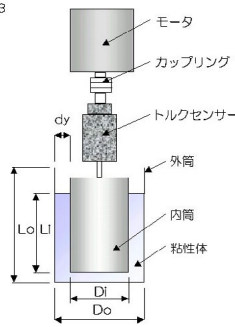


図-19 回転粘度計

表-5 試験概要

| 諸元 | 内筒 | | 外筒 | | 隙間 |
|------|--|----|-----|-----|----|
| | Di | Li | Do | Lo | |
| ロット | 36 | 40 | 120 | 150 | 42 |
| 試料粘度 | 10,000, 30,000, 100,000, 300,000 [cSt] | | | | |
| 試験手順 | A → B → C → D → E → F → G 100[rpm] 250[rpm] 450[rpm] 60[sec] 60[sec] 60[sec] | | | | |

向を示している。

この現象を実験的に観察するため、図-19 に示す回転粘度計により検証を行った。試験概要を表-5 に示す。試験は、内筒の回転数を一定に上昇後、下降させトルク(T)の変化と回転数(N)の関係を計測した。T-N 関係を図-20 に示す。10,000cSt では線形的関係にあると言えるが、高粘度になるに従い、非線形性が強くなっている。300,000cSt においては N の上昇時と下降時では T-N 関係に大きなズレが生じている。

次に、3段階の N 毎(表-5)に N を 60 秒間一定に保持させ、時間的な T の変化を観察した。時間の経過に伴い(繰り返しせん断の影響) T の低下が見られており(図-21), N 下降時には線形的な挙動を示している。数秒のインターバルで再び試験を行うと、初期のスケルトン上を動くこととなる。これらの現象は、分子間の絡み合い(2次結合力)が存在する⁶⁾ことを示しており、上昇時に T によってほぐされた 2次結合力が、下降時では弱まったままのため、直線的な履歴を示したと考えられる。これは図-9 の F-V に類似しており、高速時にはこのような現象が起こっていることを裏付けるものである。また、測定時には、回転軸を中心に液面が上がる現象が見られ、時折、界面で滑りのような現象が観察された。

(2) 小型装置による再現性の検証

UCSD での試験結果の再現性の確認および粘性抵抗力の低下率を定量的に把握するため、小型装置による再現性の検証を行った。検証用試験体の諸元を表-1 に、

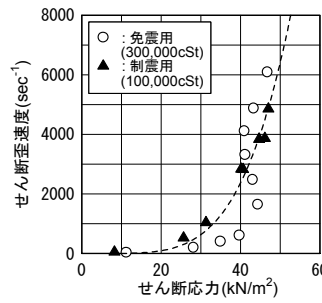


図-16 Vs-τ 関係

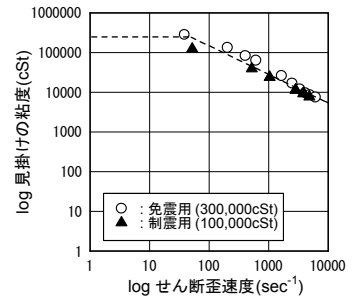


図-17 粘度-Vs 関係

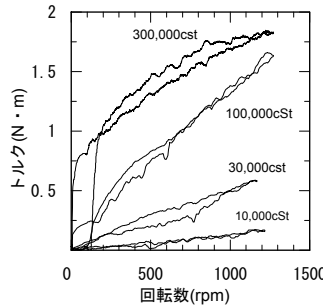


図-20 T-N 関係

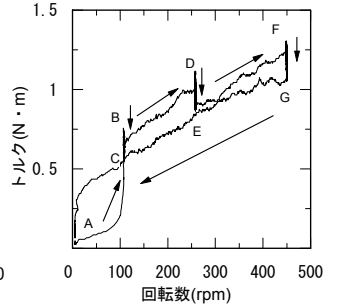


図-21 繰り返しせん断の影響

試験体概要を図-22 に示す。充填する粘性体の粘度は 3 万, 10 万, 20 万, 30 万, 50 万 cSt の 5 種類とした。試験は、加振機的能力により最大速度 0.65m/sec, 最大せん断歪速度 2,366sec⁻¹ の範囲で行った。

a) 圧力付加なしの場合

シリコンオイルは高圧にすると、自由体積が減少して、高分子鎖の移動が困難となって粘度が増大し⁷⁾粘性抵抗力が上昇するので、装置上部にあるパuffa を完全に開放して内圧がかからない状態で試験を行った。代表的な(3 万, 30 万 cSt) τ-Vs 関係を図-23 に示す。応力の差異が見られ始める Vs の領域は、UCSD の試験とほぼ同様の 750~1,000sec⁻¹ であった。1・2 サイクル目の応力の低下率ξと Vs の関係を図-24 に示す。粘度の違いに関係なく、Vs に依存してξの低下が見られる。UCSD 試験結果の制震用が他の傾向に比べてやや低めであるが、Vs=6,000sec⁻¹ 付近で約 0.75 の低下率であった。図-25 にξとτの関係を示す。同じξにするためには粘度の高い方が大きなτを必要とすることが分かる。

b) 圧力付加ありの場合

粘性抵抗力の低下を抑制させる方法として、界面の表面処理、リブ等による加工および粘性体の圧力依存性を利用すること等が考えられる。ここではパuffa 内の圧力を調整することにより、応力低下の抑制効果の確認を行った。代表的な圧力有り無し の F-δ の比較を図-26 に、必要最低圧力と軸速度との関係を図-27 に示す。必要最低圧力は粘度によって多少異なるが、軸速度にほぼ比例して圧力を付加させることにより、サイクル毎の荷重の低下を抑制させることができた。

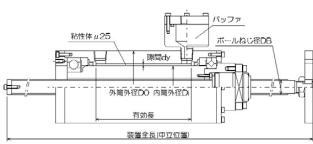


図-22 検証用試験体

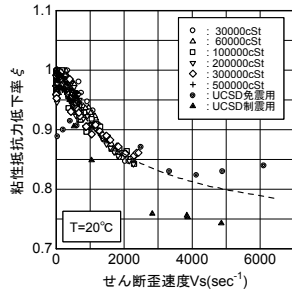


図-24 ξ - V_s 関係

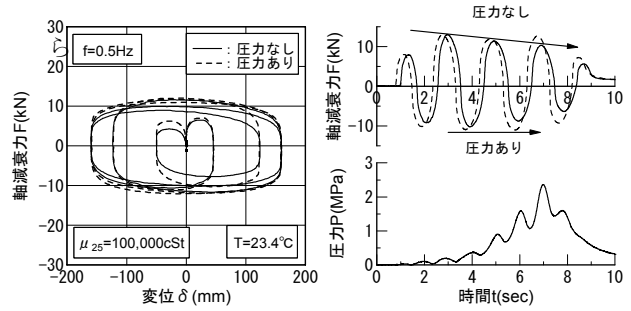


図-26 圧力有り無し F- δ 関係の比較

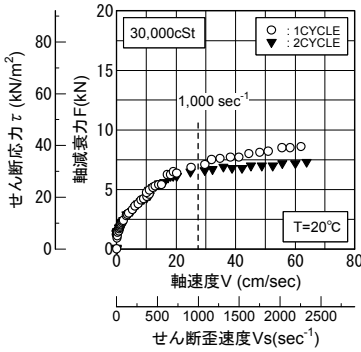


図-23 τ - V_s 関係

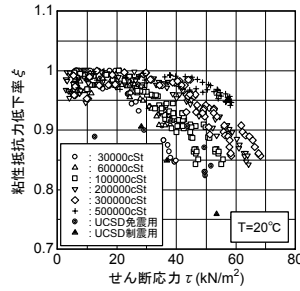


図-25 ξ - τ 関係

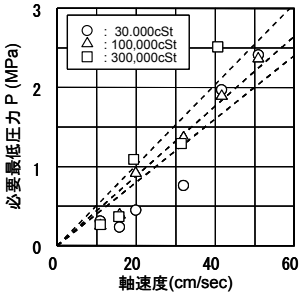
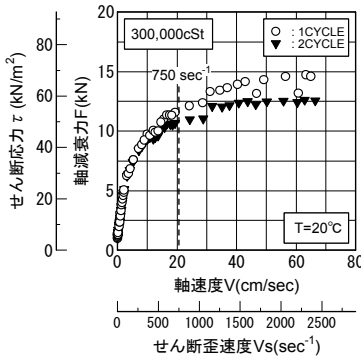


図-27 圧力-軸速度関係

られることが分かった。また、この応力の差異を抑制させる方法として粘性体の圧力依存性を利用できることが分かった。

謝辞：本試験の実施に当たり、米国 DIS 社の多大な御協力を得た。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 黒田英二：高性能粘性減衰装置の力学特性評価とその応用に関する研究，1999.9
- 2) JSSI 社団法人日本免震構造協会：免震部材標準品リスト，ダンパー，粘性体ダンパー，STM 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま，pp.353-358，2001.9
- 3) 中南滋樹，黒田英二，鈴木良二，井上豊，馬場研介他：増幅機構付き減衰装置の開発，その 6 見掛けの粘度による粘性減衰力の評価法，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.873-874，2000.9
- 4) 鈴木良二，黒田英二，中南滋樹，井上豊，馬場研介他：増幅機構付き減衰装置の開発，その 7 非線形な減衰係数モデルの検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.875-876，2000.9
- 5) THK 株式会社：直動システム総合カタログ
- 6) 村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書株式会社
- 7) 高分子刊行会：講座レオロジー レオロジー学会編
- 8) 鈴木亨，古橋剛，光阪勇治，中南滋樹他：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における評価，その 1 試験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.759-760，2003.9
- 9) 光阪勇治，古橋剛，中南滋樹，田中久也他：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における評価，その 2 高速試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.761-762，2003.9
- 10) 中南滋樹，古橋剛，光阪勇治，鈴木亨他：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における評価，その 3 高せん断歪速度領域の粘性抵抗力，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.763-764，2003.9

7. まとめ

以上の検討結果より，以下のようなことが分かった。

- ・ 1.5m/s 高速試験およびオフセット試験より，本装置は減衰装置として高い性能を保有していることを確認した。また，装置を構成する各要素は，高速領域においても高い動作性を示すことを確認した。
- ・ 最大累積 E は，3,874kN・m に達したが，温度上昇は 6.7°C であった。免震用については最大速度 0.6m/s から 1.5m/s までの 7 ケースの試験を各々 20 分間隔で行い，総累積 E が延床面積 1 万平方メートルを有する建物の地震時総入力 E の約 4 倍に相当する約 2.0×10^7 J に達したが，温度上昇は 30°C 程度であり，温度上昇が少ないという特性を確認した。
- ・ 高速度領域における性能の特徴として，ある応力を経験する前の荷重と，経験後の荷重では大きな差異が生じることが分かった。これらの要因は，粘性体の構造特性である 2 次結合力の低下による影響，繰り返しせん断による影響及び界面での滑り現象があげ