

1. 1 はじめに

粘性ダンパーは変形の大小に関わらず、エネルギーを吸収できる優れた制振装置である。そのため地震動だけでなく、風揺れに対してなど適用範囲は広い。また、本研究対象の米国メーカー製のテイラーダンパーは、そもそも軍事用に開発された高い信頼性と、世界で多数の採用実績⁷⁾がある。

しかし近年、特に小さな変形ほど、メーカーが提示する規格値による解析では、実挙動が再現できないとの指摘がある⁸⁾。従来の仕様規定から、性能規定へ移行しつつある現在、建物の要求性能は今後より一層多様化すると考えられ、小変形も含めたダンパーの実性能の把握が重要である。

また、極めて大規模な東北地方太平洋沖地震を受けて、今後設計で考慮すべき地震動レベルはますます増大していくと考えられる。制振設計においても、より大きな外乱を考慮するためには、制振部材自体の限界性能の把握が重要である。しかし、既往の研究では大振幅・高速度での破壊実験が実施されたのみであり⁹⁾、文献1で想定される過熱による破壊性状を明らかとした研究もない。

以上を背景に、本研究では実大の粘性ダンパーを試験体とした実験から、小変形を含めた実性能を把握し、4種の限界状態を想定した実験から、限界性能を明らかとする。そして、解明された限界性能が、建物の制振効果へ与える影響を論じる。

2 基本性能

2. 1 粘性ダンパー概要

本研究で対象とする粘性ダンパーは、封入した粘性体の流動抵抗力をダンパー力として利用する流動抵抗式である(図1)。この方式は外力のエネルギーを粘性体の熱に変え、大気中へ消散するため、疲労が生じない。

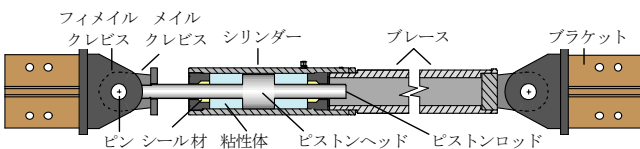


図1 粘性ダンパーの構成

粘性ダンパーは非線形の粘性要素とバネ要素の直列体を用いてモデル化され、その荷重変形関係は、荷重を速度の指数乗としたモデルで精度良く表される(図2)。ここで、図2中の F_d =ダンパ

一力、 C_d =粘性係数、 α =指数係数、 K_d =内部剛性、 u_d =粘性要素変形、 u_m =ダンパーストロークである。なお、添え字「0」は最大値を意味する。

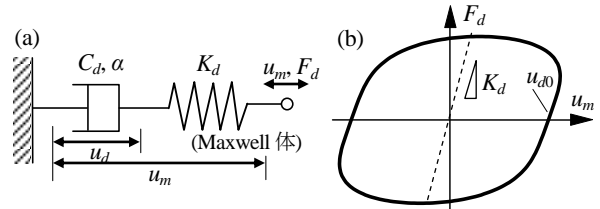


図2 (a)ダンパーモデル、(b) F_d - u_m 関係

2. 2 実験概要

粘性ダンパーの基本性能を検討するため、振幅と振動数を組合せた正弦波载荷(载荷振動数 $f = 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3$ Hz の6種×目標ダンパーストローク $u_{m0} = \pm 0.5, 1, 3, 6, 12, 24, 36$ mm の7種の全41種)を実施した。試験体は小中大のダンパー容量(それぞれ500 kN, 1000 kN, 2000 kN)ごとに各2本ずつで、規格値 $C_d = 49, 98, 196$ kN/(s/mm) $^\alpha$ である。また、全容量共通でダンパーストローク = ± 100 mm、規格値 $\alpha = 0.38$ 、規格値 $K_d = \infty$ である。

なお、これまでもこのような正弦波载荷は実施されてきたが⁴⁾、温度計測がなく、载荷による温度上昇の影響を含んでいたため、シリンダー表面温度を複数点計測し、温度を管理・調節した。

2. 3 同定法の提案

実験データから α, C_d, K_d を得る同定法は複数提案されているが^{3), 5)}、どれも全正弦波载荷を精度良く再現できず、同定値の精度が低いことを確認した。そこで文献3の方法を改善することで全正弦波载荷を図3のように精度良く再現できる新たな同定法を提案する。

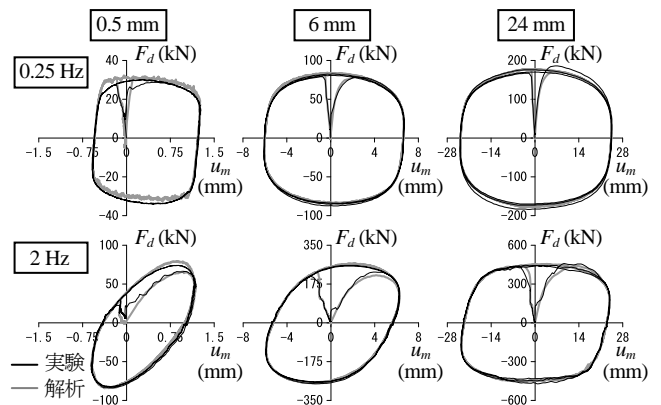


図3 実験と解析(同定値)の F_d - u_m 関係の比較

その方法は、 α, C_d, K_d を変数として、式(1)の構

成則から、Runge-Kutta 法によって F_{da} を求め、式 (2) の R が最小となる最小 2 乗法から求める方法である。なお、式中の F_{da} = 解析ダンパー力、 i = ステップ数、 N = データ数である。

$$\frac{\dot{F}_{da}(t)}{K_d} + \operatorname{sgn}(F_{da}(t)) \left(\frac{|F_{da}(t)|}{C_d} \right)^{1/\alpha} = \dot{u}_m(t) \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^N (F_{d,i} - F_{d,i}(\alpha, C_d, K_d))^2 \quad (2)$$

2. 3 実性能の把握

2.2 節の同定法で得た α , C_d , K_d から粘性ダンパーの実性能を検証する。図 4 に中容量ダンパーの同定値 α , K_d と u_{d0} の関係を示す。ここで、シンボルは実験値を意味し、破線は全体の傾向が判別しやすいようにシンボルを結んでいるだけである。また、全容量で以下の傾向は同様であった。

まず、 α は小振幅では、低振動数ほど 0 に近い摩擦ダンパーの挙動となり、高振動数になるに従って、 α が 1 以上の線形粘性ダンパーの挙動となることがわかる。また、大振幅では、振動数に依存するものの一定値に落ちつく傾向がある。

次に、 K_d は小振幅では低振動数ほど大きくなる傾向があるが、大振幅では振動数に関わらず、一定値に落ち着く傾向がある。特に 1~3Hz に限定すると、概ね一定値 ($K_d=188$ kN/mm) であり、規格値の ∞ では過大評価であることがわかる。

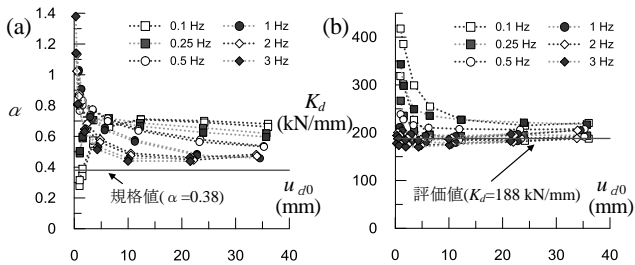


図 4 中容量ダンパーの (a) α - u_{d0} 関係, (b) K_d - u_{d0} 関係

最後に、これまで C_d は α に依存した単位 (kN·(s/mm) ^{α}) であることを考慮せず、異なる α をもつ C_d から、ダンパー性能の評価が試みられていた⁴⁾。しかし、 α が異なる C_d では実性能の評価が困難なため、式 (3) から規格値 α のときの C_d に変換する²⁾。さらに、 C_d' を各容量の規格値 C_d で除し、その性能を把握する。式中の $\alpha'=0.38$ (規格値)、 $C_d' = \alpha$ が規格値のときの C_d である。

$$C_d' = C_d (\omega u_{d0})^{\alpha-\alpha'} \quad (3)$$

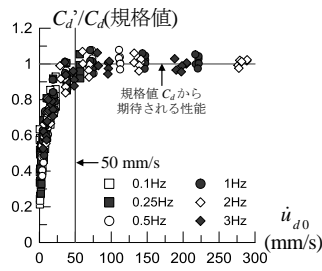


図 5 C_d' - u_{d0} 関係 (全容量)

図 5 に、 C_d'/C_d (規格値) と u_{d0} の関係を示す。同図から、50 mm/s 以下の小速度では、規格値で期待される性能が発揮できていないことが分かる。

2. 4 設計で用いるパラメータ

次に 2.3 節を踏まえ、粘性ダンパー設計時に各パラメータをどう設定することが妥当か述べる。

まず、 K_d は ∞ ではなく、一定値とすることが妥当である。近年は $K_d = \infty$ としてきたテイラー社でも、この値は不相当として、 K_d と支持材剛性 K_b の直列バネの剛性を、ダンパー容量/(ダンパーストローク $\times 0.06$) という簡易式で評価している。これを受けて、今回の同定結果から、 K_d は簡易式中の 0.06 を、0.04~0.05 とし、 K_b は支持材のディティールにあわせて評価することを提案する。

次に α は、制振設計者が調節することは現実的でないため、メーカー規格値を用い、50 mm/s 以下の小速度では C_d を低減して設計することが妥当である。

また、 K_d をここで述べた一定値、 α を規格値、規格値 α のときの C_d ($=C_d'$) を用いて、1 サイクルあたりのエネルギー吸収量 E_d を解析から評価すると、実験 E_d と比べて、誤差は平均 4 % であり、上記の提案が妥当であるといえる。ただし、 α , C_d は振幅・振動数に依存した煩雑な傾向があるため (2.3 節)、ランダム波载荷の解析には、より実状に適合したパラメータのモデル化が必要であった。

3 限界性能

3. 1 実験概要

粘性ダンパーの限界性能を検討するため、以下の 4 種の限界状態を想定した実験を実施した。

- ・ストローク以上の引張を受けたとき (引張試験)
- ・ストローク以上の圧縮を受けたとき (圧縮試験)
- ・高速の振動を受けたとき (高速試験)
- ・長時間の振動を受けたとき (長時間試験)

引張・圧縮試験は図 6 上のダンパー実験セットアップで、高速・長時間試験は図 6 下に示す入力変位を 2 倍に増幅する装置を用いた実験セットアップで実験を行った。

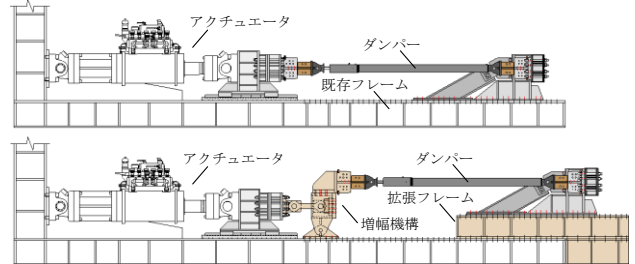


図 6 実験セットアップ

また、以下では図 7 に示すように各部を呼称し、各計測箇所での変形を図中の記号のように定義

した。なお、試験体は長時間試験では中容量ダンパー、それ以外は小容量ダンパーとした。また、各実験結果は表1にまとめる通りである。

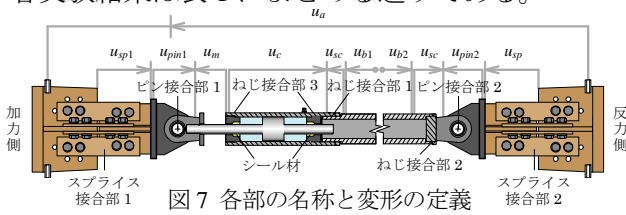


表1 各破壊実験での破壊モード

| 試験種別 | 破壊モード |
|------|--------------------------------|
| 引張 | ねじ接合部2で脆性破壊した。 |
| 圧縮 | ねじ接合部2の破壊後、ねじ接合部1で塑性ヒンジが発生した。 |
| 高速 | 破壊されなかった(ダンパーストロークで最大82 kine)。 |
| 長時間 | シール材が露出し、粘性体が漏れ出す状態となった。 |

3.2 ストローク以上の引張を受けたとき

図8にストローク以上の引張を受けて荷重が生じた時点からのロードセルの荷重 F_{LC} と付加系変形 u_a の関係を示す。以下では、 $(u_a(\text{mm}), F_{LC}(\text{kN}))$ を用いて、変形と荷重の値を示し、降伏時、最大耐力時の変形と荷重を $\delta_y, P_y, \delta_u, P_u$ と定義する。

図8に示すように剛性変化がほとんど生じないうちに、 $(9.7, 1115) = (\delta_u, P_u)$ で、ねじ接合部2に破壊が生じ分断されて、荷重支持能力を失った。文献6の方法で、 δ_y, P_y を求めると弾性と評価され、塑性率 $\mu = \delta_u / \delta_y = 1$ である。以上から、引張に対して粘性ダンパーは弾性的のまま、脆性的に破壊し、最大耐力はダンパー容量の2.2倍だった。

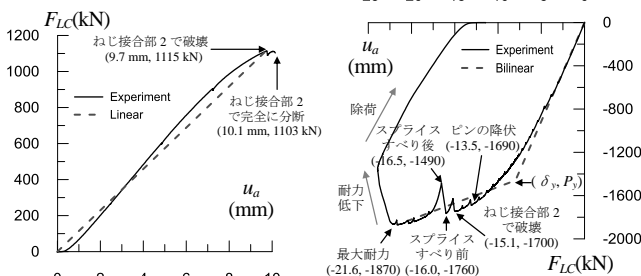


図8 F_{LC} - u_a 関係(引張試験)

図9 F_{LC} - u_a 関係(圧縮試験)

3.3 ストローク以上の圧縮を受けたとき

図9にストローク以上の圧縮を受けて、荷重が生じた時点からの F_{LC} と u_a の関係を示す。以下に、圧縮試験での破壊の進行状況をまとめる。

- 1) $(-13.5, -1690)$ でピン接合部1のピンが降伏した。
- 2) $(-15.1, -1700)$ でねじ接合部2が破壊した。
- 3) $(-16.0, -1760)$ でスプライス接合部1,2ですべり。
- 4) $(-21.6, -1870)$ で最大耐力に達した。
- 5) ねじ接合部1が塑性ヒンジとなり耐力低下。
- 6) $(-23.9, -1380)$ まで荷重し、以降除荷した。

ここで、ねじ接合部2の破壊後、再度荷重を支持できたのはメイルクレビスがブレースの厚みの縁に接触したためである。また、スプライス接合部1,2でのすべり後も支圧支持となり、再度荷

重を支持できた。なお、圧縮試験では $\delta_y = -8.0 \text{ mm}$, $P_y = -1460 \text{ kN}$ で $\mu = 2.7$ であり、以上から、粘性ダンパーは引張より圧縮に対して、じん性のある部材であることがわかる。また、最大耐力はダンパー容量の3.7倍であった。

3.4 高速の振動を受けたとき

正弦波载荷(3波)を、 $f = 3.5 \text{ Hz}$ に固定し、 u_{m0} を $\pm 9 \text{ mm}$ から順に 6 mm ずつ増やして、アクチュエータの载荷限界速度の 50 kine となる $u_{m0} = \pm 39 \text{ mm}$ まで計6回载荷した。この力 F_d と変形 u_m の関係を図10に示す。同図の凡例に9点移動平均した u_m の最大速度を示した。また、破壊の判定方法は、本载荷前の確認载荷($f = 1 \text{ Hz}$, $u_{m0} = \pm 6 \text{ mm}$)と、本载荷後、シリンダー表面温度が充分低下した後に実施した確認载荷との履歴の比較に拠った。今回の高速試験では、図10(b)に示すように、本载荷前と全载荷後の確認载荷で変化がないことから、破壊していないと判定する。すなわち、粘性ダンパーは 82 kine 程度の高速度では破壊されなかった。

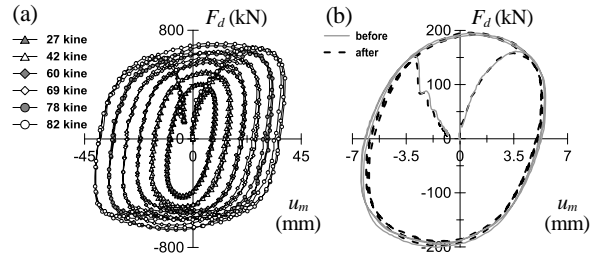


図10 高速試験での(a)本载荷と(b)確認载荷

3.5 長時間の振動を受けたとき

長周期地震動を考慮して、 $f = 0.25 \text{ Hz}$, $u_{m0} = \pm 20 \text{ mm}$ の载荷(40階程度の超高層建築(固有周期 $T_f = 4 \text{ s}$)で $1/170$ 程度の層間変形角 θ を想定)を、ダンパーの破壊が確認されるまで計4回実施した。载荷内容と载荷後の損傷状況、確認载荷の結果は表2にまとめる通りである。

図11(a)に本载荷の1例としてNo.2の力 F_d と変形 u_m の関係を示し、図11(b)に本载荷前と全载荷後の確認载荷での F_d - u_m 関係を示す。また、図12にNo.2の载荷回数と各サイクルの最大ダンパー力 $F_{d0,i}$ と1波目の最大ダンパー力 $F_{d0,1}$ の比、表面温度(シリンダー中心とピストンロッド(図13(a)))の2軸グラフを示す。

これまで流動抵抗式の粘性ダンパーは、長時間の载荷による F_d の低下が小さいと示されていたが⁷⁾、図11(a)、図12に示すように、50波(3分20秒間)で0.8倍、150波(10分間)で0.6倍、450波(30分間)で0.4倍の著しい低下が確認された。また、長時間载荷での破壊性状はシール材の露出や、粘

性体漏れ(図 13)が生じるだけで安定しており、No.2 までは目視での異常は見られず、No.3 ではシール材の露出にも関わらず、確認载荷に問題がなかったことから、その耐久性は非常に高い。

最後に、図 11(b)に示すように全载荷終了後の F_d-u_m 関係は粘性体の漏れに起因するガタが生じていることから、破壊したと判定する。

表 2 長時間試験内容

| No. | 载荷時間 | 载荷回数 | | 载荷後の損傷(破壊)状況 | 確認载荷 |
|-----|------|------|------|------------------|-----------------|
| | | 連続 | 累計 | | |
| 1 | 10分間 | 150 | 150 | 異常なし | 問題なし |
| 2 | 30分間 | 450 | 600 | 異常なし | 問題なし |
| 3 | 1時間 | 900 | 1500 | シール材が露出 | 問題なし |
| 4 | 3時間 | 2700 | 4200 | シール材の露出が進行。粘性体漏れ | F_d-u_m 関係にガタ |

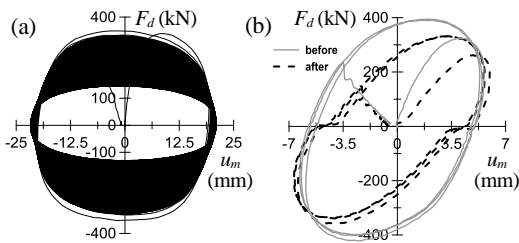


図 11 長時間実験での(a)本载荷と(b)確認载荷

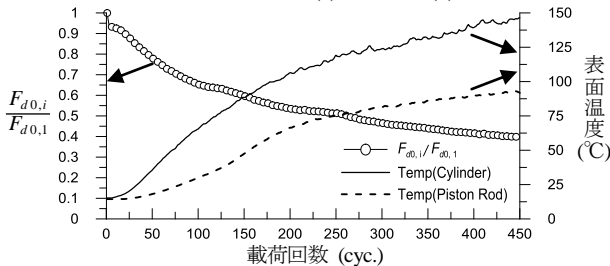


図 12 载荷回数と $F_{d0,i} / F_{d0,1}$ 、表面温度の関係

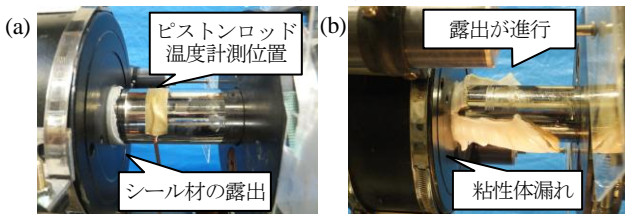


図 13 各载荷での損傷状況

4 制振効果への影響

4.1 ダンパー性能が低下したとき

本節では設計用応答スペクトルと制振性能曲線を用いることで、時刻歴解析のような特解ではなく、より一般的な傾向について論じる。

まず、3.5 節で想定した超高層建築が長周期地震動を受けて、ダンパー性能が低下した場合を考察する。長周期地震動による応答レベルを設計用応答スペクトル(レベル 2(極稀), 2種地盤, 地域係数 $Z=1.0$, $h=2\%$)として、制振性能曲線に基づいて $\theta=1/170$ となるよう設計した場合 ($K_d^*/K_f=0.5$, $K_b^*/K_f=1.5$) を考える。なお、高さ $H=160$ m(階高 4 m \times 40 層) として、応答変位 S_d から等価高さ $H_{eq}=2/3H$ を除して θ を求めた。また、 K_f =架構剛性、 K_b^* =等価支持材剛性である。

図 14 左にこのときの応答加速度 S_A と θ の関係

を示す。同図中の白丸から、30 分間もの長時間の地震動でダンパー性能が 0.4 倍となっても、加速度応答は変化がなく、変位応答も 1.18 倍程度である。よって、ダンパー性能が著しく低下しても、制振効果が急激に低減するわけではないことが分かる。

4.2 ダンパーが破壊される地震動レベル

3 章で述べたように、長時間の载荷を除けば、3.1, 2 節で述べたようにストローク以上の変形を受けたとき、ダンパーが破壊される(これまで想定してきた超高層建築では $\theta=1/30$)。また、対象の θ と骨格曲線が交わる点に、相似形となる特性がある制振性能曲線が交わる倍率が対象の地震動レベルとなるので、4.1 節の地震動レベルの約 4.7 倍でダンパーが破壊されることがわかる(図 14 右)。この評価では線形スペクトルを用いたため、実際は架構の塑性化から周期はやや長くなるものの、減衰が大きくなり、変位はやや小さくなると思われるので、安全側の評価である。

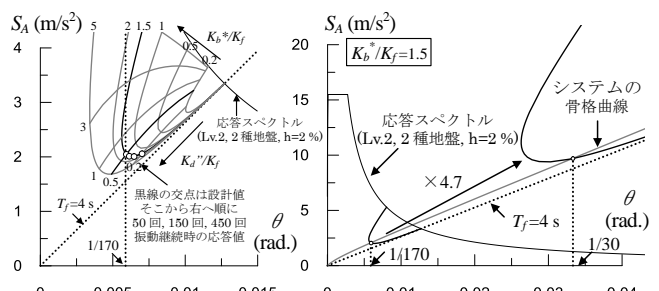


図 14 $S_A-\theta$ 関係(左=性能低下の影響、右=ダンパー破壊時)

5 まとめ

実験と高精度な同定法から基本性能を明らかにし、設計時の要点をまとめた。また、種々の実験から限界性能を検討し、それらを踏まえて、制振効果に及ぼす影響を論じた。

【参考文献】

- 1) 日本免震構造協会 (JSSD): パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第 2 版, 2005.9
- 2) 笠井和彦, 鈴木陽, 大原和之: 減衰力が速度の指数乗に比例する粘性ダンパーをもつ制振構造の等価線形化手法, 日本建築学会構造系論文集第 574 号, 2003.12
- 3) 有馬義人, 他: 4 種制振ダンパーの実大動的加振実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.863-864, 2008.7
- 4) 関川久範: 粘性ダンパー、オイルダンパーを用いた実大 5 層建物の実験に基づく構造および設備機器の応答に関する考察, 2010 年度東京工業大学修士論文
- 5) 山際創: 粘性・オイルダンパーをもつ実大 5 層建物の実験結果に関する解析的考察, 2011 年度東京工業大学修士論文
- 6) 笠井和彦, 徐養会: アングルを用いたボルト半剛接の繰返し弾塑性挙動に関するパラメータ実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 560 号, pp.169-179, 2002.10
- 7) 明友エアマチック株式会社: 免震・制振用テイラーフルード粘性ダンパーカタログ
- 8) D. Konstantinidis, J. M. Kelly, N. Makris: In-Situ Monitoring of the Force Output of Fluid Dampers: Experimental Investigation; PEER 2011/103, 2011.4
- 9) H. K. Miyamoto, et al.: Limit States and Failure Mechanisms of Viscous Dampers and the Implications for Large Earthquakes, Earthquake Engng Struct. Dyn, 2010