

TMD制御機構のコンパクト化に関する研究

A Study on Compact Vibration Reduction System with TMD

高井 茂光*
Shigemitsu Takai

要 約

本論は建築・土木構造物の振動制御に広く用いられているTMD（同調質量ダンパー；Tuned Mass Damper）の性能を改善する方法について述べたものである。

TMDの制御効果の大きさは補助質量比に支配され、制御可能な外乱の大きさは補助質量比と機構の最大ストロークによって規定されると考えられる。いずれも大きい方がより高い制御効果を得るが、経済性の観点からはこれらは小さいことが望まれる。

そこで本論では、より短いストロークでより大きな外乱に対応できる機構を提案し、数値計算によりその効果を検討した。その結果、機構に要求される最大ストロークが地震動のような非定常外乱によって規定される場合には、制御効果を大きく失うことなくストロークを縮小できる可能性が大きいことを見出している。

目 次

- § 1. 序
- § 2. ストローク制限機構
- § 3. 各機構の動特性
- § 4. 定常応答
- § 5. 地震波応答
- § 6. 結語

§ 1. 序

TMDの基本的な制振原理は、TMDを付加することにより制御対象構造物の振動エネルギーをTMDに移動させ、ダンパーなどによって振動エネルギーを熱エネルギーに置換、消散させ、振動を制御していると考えられる。この目的を達成するためには、制御対象構造物とTMDが約 $\pi/2$ の位相差で振動するように動特性を調整することが必須の条件となるが、逆に位相差が保持できれば振幅や波形形状等が多少乱れても、振動制御性能が極端に劣化することはないと考えられる。

そこで本論では、応答値レベルに応じて減衰を増大させてストロークを制限する機構を提案し、その時の振動制御性能とストローク制限の関係を定常波と地震波の応答について解析し、よりコンパクトなTMDの構築について検討した結果¹⁾を報告する。

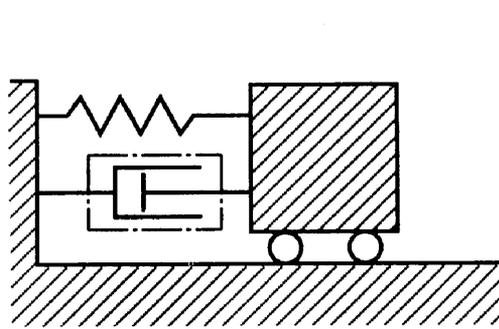
§ 2. ストローク制限機構

2-1 各ストローク低減機構

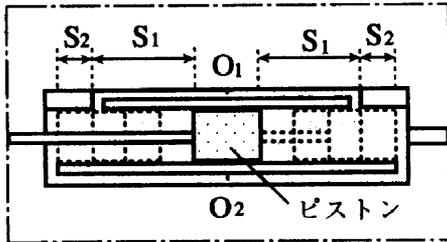
本論で想定しているストローク制限機構はP1、P2、およびA1機構の3つあり、いずれもTMDの減衰係数を大きくすることでストロークを制限できる仕組みになっている。以下にその説明をする。

P1機構の減衰係数は図-1(c)に示すように、変位が S_1 以上になると減衰係数が大きくなり、 S_1 以下になると元の減衰係数になるような特性をもたせている。具体的には図-1(b)に示すようなダンパーが考えられる。このダンパーは O_1 、 O_2 の2つのオリフィスを有しており、ダンパーのストロークが $\pm S_1$ 以上になるとピストンが一方の流路を塞ぎ、オイルはオリフィス O_2 だけを通して流れるようになって、パッシブに減衰係数が大きくな

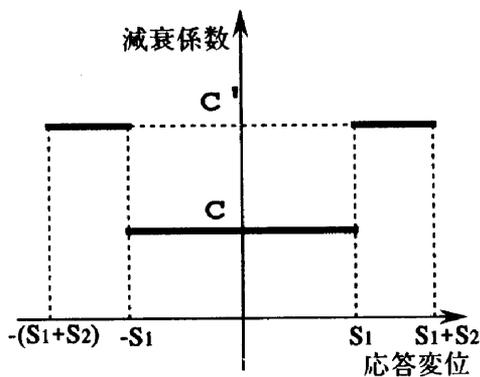
*技術研究所構造研究課



(a) P 1 機構全体図

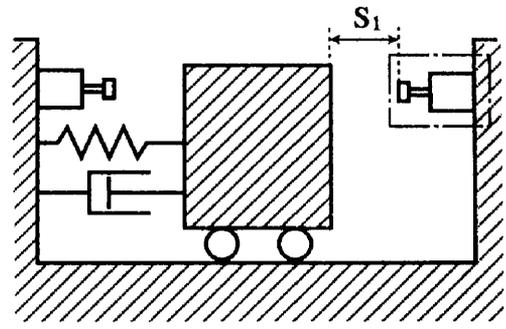


(b) P 1 機構用ダンパー断面図

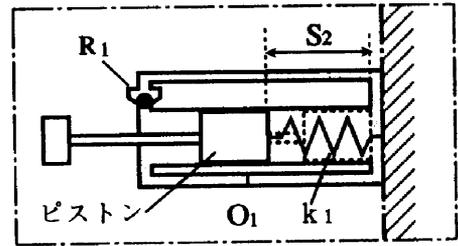


(c) 減衰係数と変位の関係

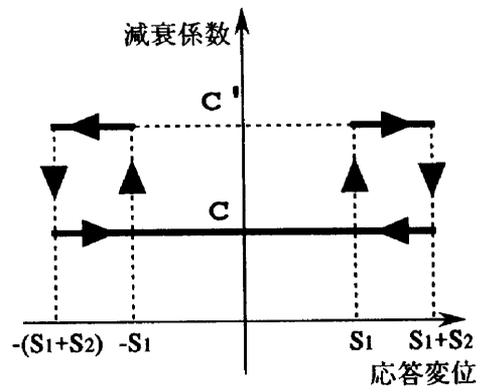
図-1 P 1 機構



(a) P 2 機構全体図



(b) P 2 機構用衝突ダンパー断面図



(c) 減衰係数と変位の関係

図-2 P 2 機構

る仕組みである。

P 2 機構は図-2 (c) に示す特性を有しており、TMDのストローク・エンド近くに図-2 (b) に示す衝突ダンパを設置した機構である。衝突ダンパは、オイルの流路としてオリフィス O_1 を通る路とチェックバルブ R_1 を通る路の2つを備えており、ダンパが縮む場合にはチェックバルブ R_1 は閉じ、オイルはオリフィス O_1 のみを通して流れ、比較的減衰の大きなダンパとして作用するが、伸びる方向ではチェックバルブ R_1 が開き、ほとんど抵抗なくリターンする。なお、内蔵されているばね k_1 は、ピストンをリターンさせるためのものであり、補助振動系の剛性に比べて無視できる大きさのものを利用する。

A 1 機構は、P 1 機構のダンパーの替わりに図-3 に示す2種類の減衰係数に切換え可能なアダプティブ・ダ

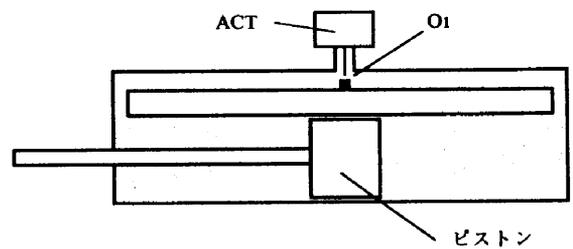


図-3 A 1 機構用アクティブダンパー

ンパを利用した機構である。通常のダンパのオリフィス部にアクチュエータを内蔵し、オリフィスの断面積を切換えようになっているが、アクチュエータはサーボ駆動せず、ON/OFFのシーケンス制御により、高速な減衰係数切換えができるものとして想定している。

この機構は、減衰係数の切換えを任意のストローク位置で行えるため、設定ストローク範囲内でも減衰係数を切換えてTMDの速度を減少させ、ストローク制限性能を向上できることが期待できる。このためにはTMD挙動の予測が必要であるが、減衰係数の切換えが2段階しかできないことから、次節に述べる簡便な推定法を用いて最大ストロークを予測し、それが予め設定したストロークを越えた時に減衰係数を切換えるというアルゴリズムでアダプティブ制御することとした。

2-2 最大ストロークの推定法

任意の時刻 t におけるTMDの変位を D_0 、速度を V_0 とし、それ以降はTMDが D_0 、 V_0 の初期条件下で自由振動すると仮定すると、時刻 t 以降に絶対値が最大となる応答変位の極値 D_{PMAX} は式 (1) で与えられる。しかし、 $D_{PMAX} \leq |D_0|$ となる場合もあるので、時刻 t 以降に絶対値が最大となる応答変位 D_{MAX} の推定値 $D_{MAX,E}$ (以降、予測最大ストロークと称する) は、 D_{PMAX} と D_0 の絶対値が大きい方を採用した。

図-4は、上記の推定法の性質を検討するために行った数値解析結果である。解析対象モデルは、固有振動数0.25Hz、減衰定数0.1の1自由度系であり、解析刻み時間および予測最大ストローク $D_{MAX,E}$ を算定する時間間隔は共に0.01sとし、0.25Hz・25Galの正弦波を地動加速度として入力させた。図中、実線は予測最大ストローク $D_{MAX,E}$ の時刻歴波形、破線は実際の応答変位の時刻歴波形であるが、半周期弱以前の時刻で次の応答変位の極値を20%程度の誤差で推定し、それ以降予測最大ストロークが真の極値に漸近することが分かる。

§ 3. 各機構の動特性

3-1 各機構の基本的な動特性

各機構の基本的な動特性を抽出する目的で、図-5に示す波形を地動加速度として入力させた場合の応答をシミュレーションした。解析に用いたパラメータは、質量 m_d は100kgf・s²/cm、固有振動数 f_d は0.25Hz、減衰定数 h_d はストローク制限機構が作動しない時0.15、作動した時 0.75 (以降、ストローク制限機構作動時と非作動時の減衰定数の比を減衰倍率 η と称するが、このシミュレーションでは $\eta=5$) とし、ストローク制限機構を作動させるストロークを6.04cm (以降、ストローク制限機構が無い場合にTMDに要求される最大ストロークに対する、ストローク制限機構を作動させるストロークの比を設定ストローク比 δ と称するが、このシミュレーションでは $\delta=0.2$) とした。

1) $h < 1$,

$$D_{P,MAX} = \exp(-h\omega\tau_p) \left\{ \frac{V_0}{\omega\sqrt{1-h^2}} \sin(\omega\sqrt{1-h^2}\tau_p) + \frac{D_0}{\sqrt{1-h^2}} \cos\left(\omega\sqrt{1-h^2}\tau_p - \tan^{-1}\left(\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\right)\right) \right\}$$

$$\tau_p = \text{Max} \left[0, \frac{1}{\omega\sqrt{1-h^2}} \left\{ \pi - \tan^{-1}\left(\frac{-\sqrt{1-h^2}V_0}{\omega D_0 + hV_0}\right) \right\} \right]$$

2) $h = 1$,

$$D_{P,MAX} = \exp(-h\omega\tau_p) \{ D_0 + (V_0 + h\omega D_0)\tau_p \}$$

$$\tau_p = \text{Max} \left[0, \frac{V_0}{h\omega(V_0 + h\omega D_0)} \right]$$

3) $h > 1$,

$$D_{P,MAX} = \frac{\exp(-h\omega\tau_p)}{2\omega\sqrt{h^2-1}} \left\{ (h\omega D_0 + \omega D_0\sqrt{h^2-1} + V_0) \exp(\omega\sqrt{h^2-1}\tau_p) - (h\omega D_0 - \omega D_0\sqrt{h^2-1} + V_0) \exp(-\omega\sqrt{h^2-1}\tau_p) \right\}$$

$$\tau_p = \text{Max} \left[0, \frac{1}{2\omega\sqrt{h^2-1}} \ln \left\{ \frac{(h + \sqrt{h^2-1})V_0 + \omega D_0}{(h - \sqrt{h^2-1})V_0 + \omega D_0} \right\} \right] \quad (1)$$

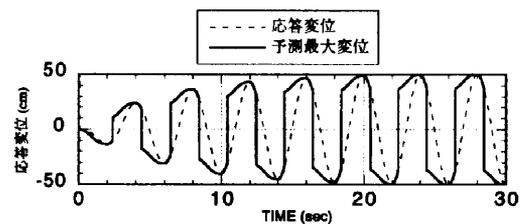


図-4 予測最大変位と応答変位の関係

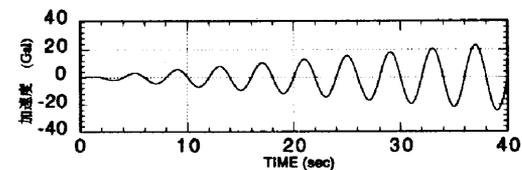


図-5 地動加速度時刻歴波形

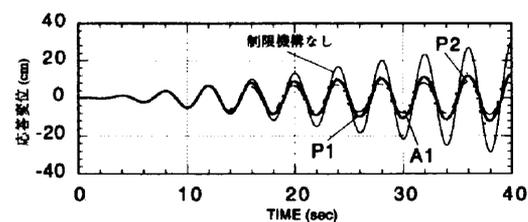


図-6 応答変位時刻歴波形

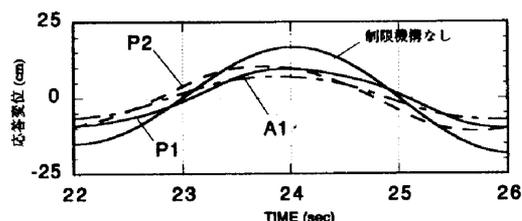


図-7 応答変位時刻歴波形

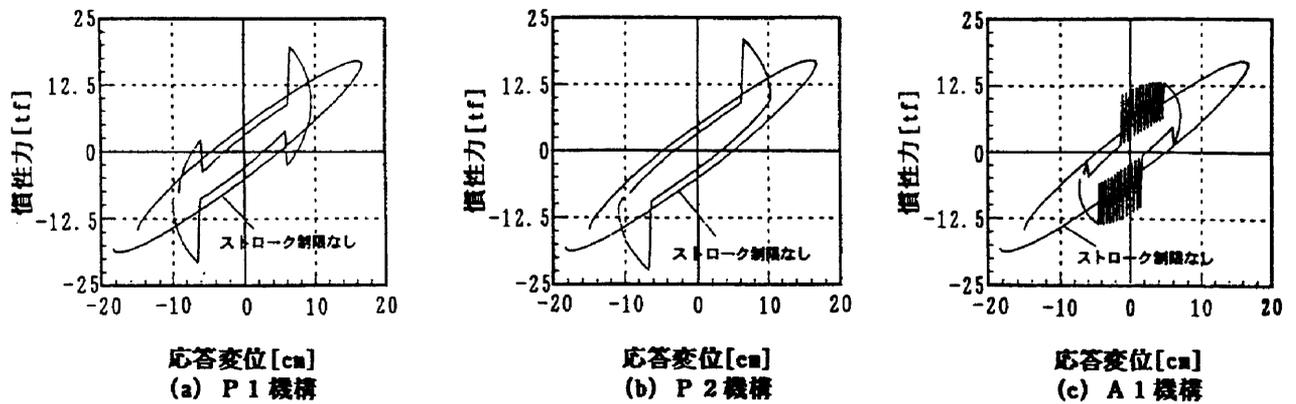


図-8 各機構の変位と慣性力の関係

応答変位 x_d の時刻歴波形を図-6に示す。図中、実線、破線、1点鎖線、細い実線はそれぞれP1、P2、A1機構及びストローク制限機構が無い場合に対するものであるが、ストローク制限性能はA1機構が最も高く、P2機構が最も低いことが分かる。図-7は図-6の22~26s間の拡大図である。ストローク制限機構が無い場合に比べ、各機構共に顕著な位相の変化は認められないが、P1機構は若干位相が遅れ、A1、P2機構は進む傾向があることが分かる。図-8は各機構における変位と慣性力の関係を22~26sの間を描いたものであるが、P1機構では、系の等価剛性は変化せず、等価減衰係数が向上しているために、若干位相遅れになったものと考えられる。また、P2機構は、等価剛性、等価減衰係数共に上げる作用をしているが等価剛性の変化の影響が大きいため、位相進みになったと推測される。A1機構では設定ストローク内でも減衰が切替わることが確認できるが、これによって、等価剛性が上がり、位相進みになったと推測される。但し、A1機構の減衰切替えアルゴリズムはコントローラのサイクルタイムで振動しており、減衰切替え機構の仕様によっては改良が必要な場合もある。

3-2 各機構の定常応答特性

図-9は各機構の定常応答特性を抽出するために行った解析の結果であり、各機構に調和波地動を入力させ、定常応答となった時の応答振幅と制限機構のない場合の応答振幅との比を縦軸に、横軸には系の固有振動数に対する入力波振動数の比をとってスペクトル的に描いている。解析モデルのパラメータは、固有振動数 $f_d = 0.25\text{Hz}$ 、ストローク制限機構非作動時の減衰定数 $h_d = 0.15$ 、ストローク制限機構を作動させるストローク値は共振振動数である 0.247Hz の正弦波が入力した時に設定ストローク比 $\delta = 0.6$ とした。(a-1)、(a-2)は減衰倍率 $\eta = 5$ 、

(b-1)、(b-2)は $\eta = 10$ の結果である。また、(a-1)、(b-1)は応答変位の定常振幅比スペクトルであり、(a-2)、(b-2)は応答絶対加速度のものである。

(a-1)を見ると、A1、P1、P2機構の順にストローク制限性能が高いこと、また、P1機構は固有振動数は変化させず減衰定数のみを増大させたのとほぼ等しい効果であるが、P2機構は固有振動数と減衰定数を共に大きくすると似た効果があることが確認できる。A1機構はストローク制限機構が作動する領域ではほぼ一定値であるが、系の固有振動数に比べ低い振動数の入力に対しては設定ストロークを若干上回るが、高い振動数の入力に対しては設定ストロークを下回る傾向があることが分かる。

(a-1)と(b-1)を比較すると、P1、P2機構では減衰倍率が大きいほどストローク制限性能が向上するがA1機構ではその影響は小さいと言えよう。またP2機構では、減衰倍率が大きいほどピークが高振動数側に移動しており、等価固有振動数も大きくなることがわかる。(a-2)、(b-2)を見ると、ストローク制限機構が作動するとTMDの絶対加速度は急激に大きくなること、そしてその度合いは、減衰倍率が大きいほど顕著であることが分かる。また両図を比較すれば、P1機構とP2機構の大小関係は、応答変位を表した(a-1)、(b-1)と整合する。しかし、A1機構では減衰倍率がある程度以下の場合には、P1、P2機構よりも絶対加速度が小さいが、減衰倍率を上げるとP1、P2機構を上回るようになることが分かる。この理由についてはより詳細な検討が必要であるが、A1機構では応答速度が最大となる付近で減衰を切替えるために生じる現象だと思われる。

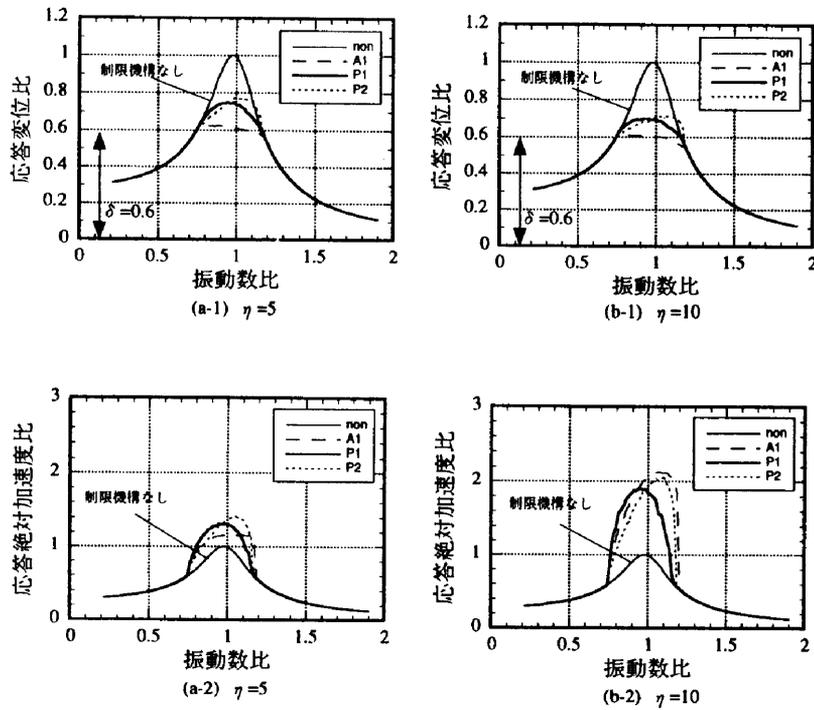


図-9 各機構の定常応答特性

§ 4. 定常応答

4-1 解析モデルと解析方法

ストローク制限機構を有するTMD制振機構について、それらの基本的な振動制御性能を検討するため、制御対象構造物の固有周期を4s、減衰定数を2%の1自由度系に各提案機構を設置したTMDの2自由度系として、調和波を地動加速度として入力させ、数値シミュレーションにより過渡応答が十分減衰して定常応答になった時の振幅を求めた。

TMD制振機構としては、制御対象構造物の質量に対する補助質量の比（以降、補助質量比 μ と称する）が1,10%の2種類を設定している。TMD制振機構の同調設計に際しては、まずDen Hartogの提案²⁾する最適同調式により、ストローク制限機構が無い場合の動特性を設計した。次に、上述した方法でTMDの最大定常振幅を求めた後、設定ストローク比 $\delta=0.6$ となるようにストローク制限機構を作動させるストロークを設定した。

4-2 解析結果

解析結果を図-10, 11に示す。各図とも横軸は、制御対象構造物の固有振動数である0.25[Hz]に対する入力波振動数の比を取ってある。縦軸は定常応答の振幅であるが、図-10は補助質量比 $\mu=0.01$ 、減衰倍率 $\eta=10$ の場合、図-11は補助質量比 $\mu=0.1$ 、減衰倍率 $\eta=10$ の場合、また、(a)はTMD制振機構の層間変位、(b)は制

御対象構造物の層間変位である。

(1) ストローク制限性能

(a)に示したTMDの層間変位を見ると、ストローク制限性能については、A1機構が最も高く、P2機構が最も低いという前章と良く整合する結果が得られている。

(2) 振動制御性能

図-11により各提案機構の振動制御性能について検討すると、P1機構が最も振動制御性能の劣化が少ないことが分かる。この理由は、P1機構では前に述べたように、等価剛性の変動が僅かであると同時に、ストロークが制限されることによって減少するTMDの吸収エネルギーを、ストローク制限機構の大きな減衰能力で補い、TMDの基本的な動特性が維持されているためであると思われる。

これに対し、A1機構では比較的大きな劣化が認められる。またP2機構については、図-10, 11ではA1機構とP1機構の中間的な性能を示しているが、図-10の補助質量比 $\mu=0.01$ 、減衰倍率 $\eta=10$ の場合には、A1機構とほぼ同等な性能である。

各機構の特性の違いについては、より詳細な検討が必要であるが、ストローク制限機構を用いることでTMD制振機構のストロークと振動制御性能の間でトレードオフを図り、制振構造の設計自由度を拡大できる可能性を示せたといえる。

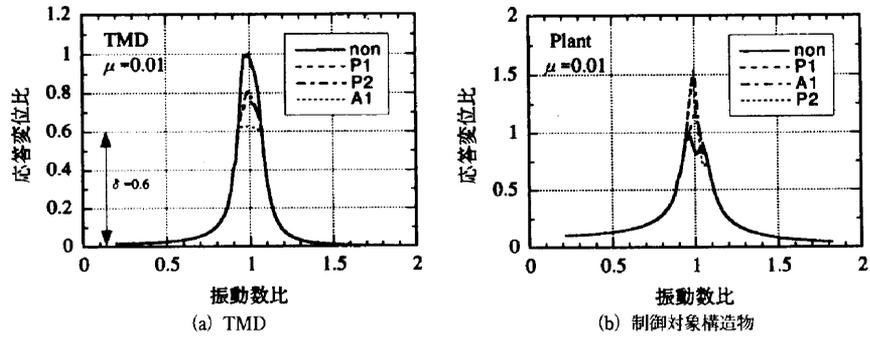


図-10 層間変位 ($\mu=0.01, \eta=10$)

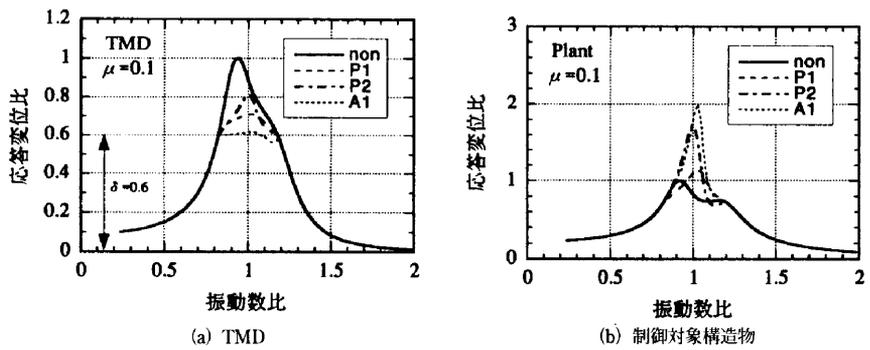


図-11 層間変位 ($\mu=0.1, \eta=10$)

§ 5. 地震波応答

5-1 解析方法

提案したストローク制限機構を有するTMDの基本的な振動制御性能について、構造物に地震波が入力する場合を対象に検討する。解析モデルは前章とほぼ同様であるが、設定ストローク比 $\delta=0.2$ とした。ここで、設定ストローク比 δ を0.2とした理由は、一般に固有周期4秒程度の高層建築構造物では地震時の応答は、風などの定常応答と比べて、2~3倍程度となるためであり、前章の $\delta=0.6$ に対して $\delta=0.2$ とした。また入力地震波として太田等の合成波形³⁾(YKH;新第3紀堆積岩の上端を自由表面)を用いた。図-12に時刻歴波形を図-13に疑似速度応答スペクトル($h=0.02$)を示す。

5-2 解析結果

解析結果を図-14~16に示す。各図の横軸は減衰倍率 η をとってあり、(a)図は $\mu=0.1$ 、(b)図は $\mu=0.01$ の場合である。また縦軸は、図-14ではTMDの応答層間変位の最大値をストローク制限機構が無い場合に対する比で表してあり、図-15は制御対象構造物の応答層間変位、図-16は応答絶対加速度の最大値を、TMD制振機構が無い場合の応答最大値に対する比で表している。すなわち $\eta=1$ はストローク制限機構のない従来型のTMDの場合の値である。図-15、16の右軸は $\eta=1$ の場合に対する比でありストローク制限のない場合との比較のため併記

してある。また、図-17、18は、TMDおよび制御対象構造物の変位時刻歴波形であり、条件は $\mu=0.01, \delta=0.2, \eta=10$ である。

(1) ストローク制限性能

図-14を見るとA1機構では、減衰倍率 $\eta=20$ で、ほぼ設定ストロークに収束しており、しかも減衰倍率 η の増大に対して急速に設定ストロークに漸近している。これに対しP1、P2機構では、減衰倍率 η の増加に伴うTMDの最大ストロークの減少は緩慢であり、減衰倍率 $\eta=20$ にしても比較的大きなストローク・オーバーになっている。これはストロークが $\delta=0.2$ を越えてはじめて制限機構が働くためである。P2機構とP1機構を比較すれば、P1機構の方が高いストローク制限性能を有している。また、補助質量比 μ の違いによるストローク制限性能の違いは、P2機構に多少見受けられるがほとんどないといえる。

図-17をみるとTMDの挙動はスムーズであり、ストローク制限機構が無い場合に比べ、各機構共に顕著な位相の変化は認められないが、P1、A1機構は若干位相が遅れ、P2機構は進む傾向があることが分かる。

(2) 振動制御性能

制御対象に対する振動制御性能の劣化傾向の違いを図-15、16から読みとると、減衰倍率 η の増加に伴い振動制御性能は劣化するが、最悪の場合でもストローク制限の無いTMDで制御した場合($\eta=1$)より3割ほど応答最

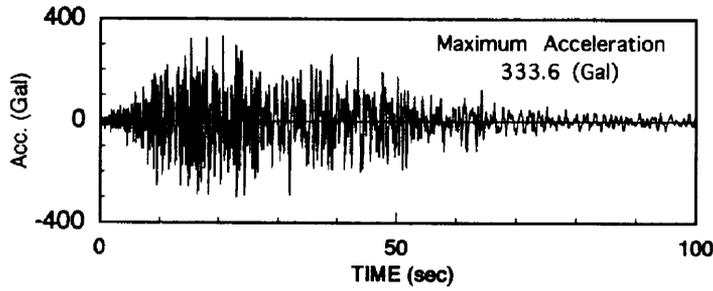


図-12 時刻歴波形

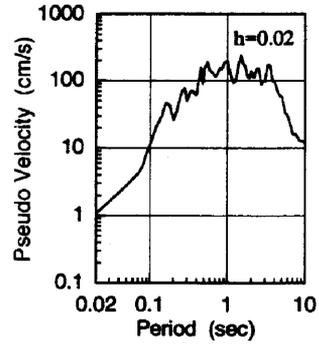
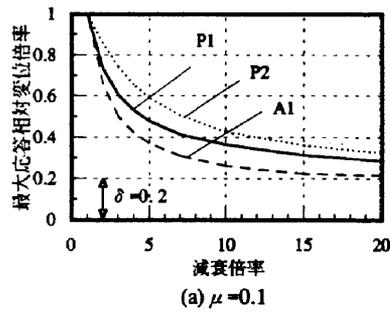
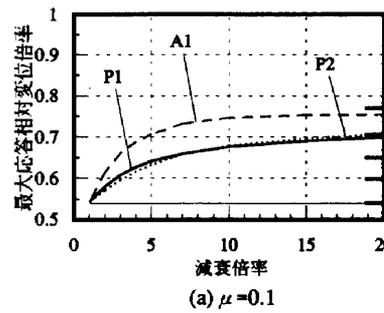


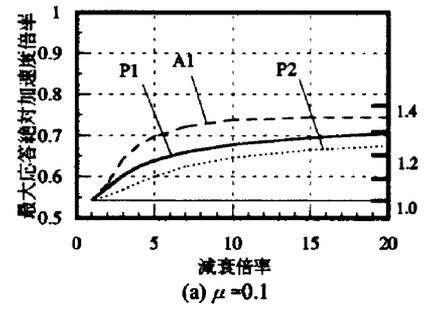
図-13 疑似速度応答スペクトル



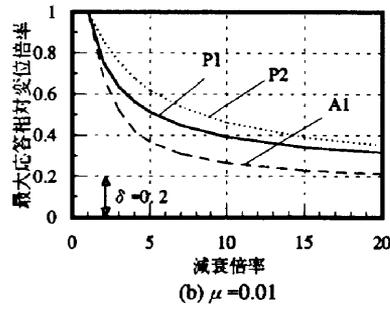
(a) $\mu=0.1$



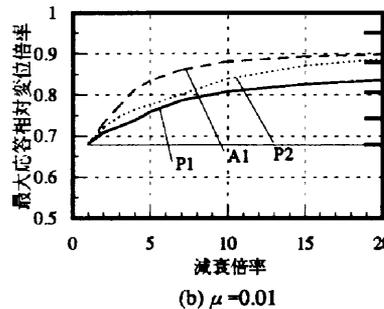
(a) $\mu=0.1$



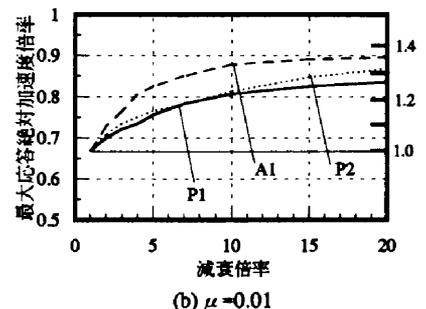
(a) $\mu=0.1$



(b) $\mu=0.01$



(b) $\mu=0.01$



(b) $\mu=0.01$

図-14 TMDの最大相対変位倍率

図-15 制御対象構造物の最大相対変位倍率

図-16 制御対象構造物の最大絶対加速度倍率

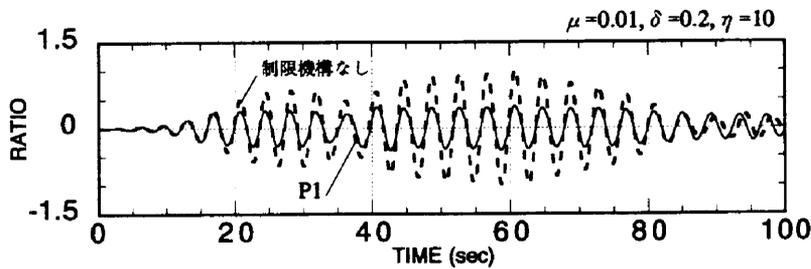


図-17 TMDの応答変位比波形

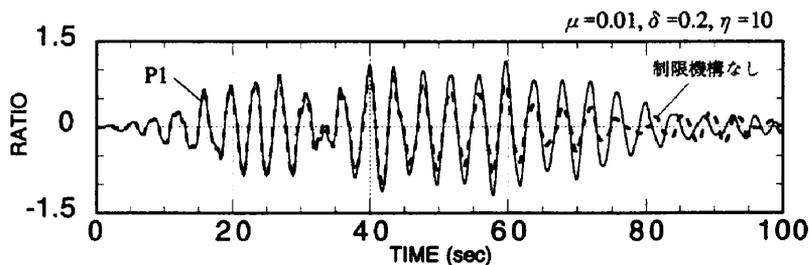


図-18 制御対象構造物の応答変位比波形

大値が大きくなる程度であり、しかもTMDのない場合以上には大きくならないことが分かる。劣化の傾向については、層間変位と絶対加速度とでほぼ同様であるが、補助質量比 μ や制御機構の種類による相違が多少認められる。これを減衰倍率 η を指標として見ると、A1機構の劣化が最も顕著であり、振動制御性能の保持という意味ではP1やP2機構の方が優秀であると言える。しかしながら、ストローク制限性能を考慮すれば、このような傾向になるのは当然であり、TMDに要求されるストロークと振動制御性能の関係を論ずるためには、より詳細な検討が必要であるといえる。

以上をまとめると、TMDのストロークを設定範囲内に保持する性能については、前章と整合する結果が得られ、A1機構が最も優秀であるといえる。しかしながら、振動制御性能の保持という観点からすると、本解析ではストローク制限機構の違いによる差異は比較的小さいのに対し、前章ではP1機構の性能が高く、A1機構ではかなり大きな劣化が認められている。この原因は、地震波入力の場合には系の過渡応答特性が応答最大値を大きく支配すること、また、制御機構に大きなストロークが要求される時間は総入力時間に較べて小さいためであると推測している。

§ 6. 結語

本論で提案した機構を有するTMDの特徴として、ストローク低減機構が働かない入力レベルでは最適同調で制御できること、それより大きな入力レベルでは、ストロークを制限し機構のコンパクト化が可能なこと、言い換えれば機構の適用範囲の拡大を計れること、が挙げられる。特に地震波応答の場合、達成されるストローク制限の割には振動制御効果の劣化は小さく、ストローク制限機構の有効性が示せた。

しかし、実際の構造設計に利用するためには、今後、ストローク制限性能と振動制御性能を定量的に評価できる指標を見出し、適切なトレードオフを計る必要がある。

謝辞

本研究を行うに当たり、日本大学理工学部石丸教授、新谷助手には、懇切丁寧なご指導を頂いた。また、同教授の研究室の学生方にも多大なご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石丸, 新谷, 高井他「TMD制震(振)機構の位相制御法に関する研究」その1~4日本建築学会大会 1994.9 PP.873-880
- 2) J.P.Den Hartog ; Mechanical Vibration (McGRAW-HILL BOOK COMPANY,INC) 1934
- 3) 嶋悦三, 太田他「ウォーターフロントにおける耐震設計用入力地振動評価」鹿島建設技術研究所年報, 第37号, 1989.10.