

(220) AMDによる模型構造物の制振

京都大学防災研究所 耐震基礎部門 土岐憲三 佐藤忠信 望月俊宏

㈱奥村組筑波研究所 技術課○吉川正昭 構造研究室 栗本雅裕 稲葉金正

1. はじめに

近年、種々の振動問題に対処し、居住性、機能性、最終構造安全性などを高める処方策として、構造物の動的応答を積極的に制御すべきであるという新しい設計法、すなわち振動制御法が注目をあびている。構造物の振動抑制は従来、基礎部への積層ゴムの設置による免震や適当な位置へのエネルギー吸収機構の配置、構造物上部の同調質量による動吸振器など主にパッシブコントロールにより実用化への移行が行われてきた。当社で開発したTRD (Tuned Roller-pendulum Damper)¹⁾の原理は、外部からエネルギーを用いず、振動している主構造系の振動エネルギーを付加振動系の減衰機構を通して熱エネルギーとして消散する。付加振動系の質量が大きく振動することが重要で、主構造物の固有振動に付加振動系のばね減衰機構の固有振動数を合わせている。

一方、機械、航空、宇宙分野の高度な制御系の発達や各種アクチュエータの開発により、外部からエネルギーを与えて付加振動系の駆動マスの動きを制御すると制振性能を確実に高めることができるため、アクティブな制振手法の導入が検討されている。そこで本論では、アクティブ制振効果を確認するために、屋上にサーボモータで駆動する可動質量(AMD)を有し、板ばねを柱とした8階建構造物を制振の検証用模型として作製した。まず、できるだけ板ばねを柔らかくし、大きく揺れる模型構造物の動特性を求めた。次に、ACサーボモータにより、駆動するAMDの制御速度を求めるため、駆動装置部のみ取り出し、入力である指令速度と出力の関係(一次遅れ系)を調べた。これらの予備結果を用い、エルセントル50ガル入力時に、AMDが作動しない無制御状態時、最適制御則にRicattiの式¹⁾を用い、入力波を考慮しない閉ループ制御(Closedループ)時、入力波を考慮する開閉ループ制御(Closed Openループ)状態時の応答比較を行った。低次元化が行えるように、閉ループ制御で、モード解析によらない場合とモード解析手法を用い、主要な2次のモードまで制御した場合を比較した。最大応答値を比較することにより、制御効果について論じている。

2. 予備実験方法と結果

8階建模型は振動台の大きさ(4m×4m)と用いる振動数に合わせて、Fig. 1に示すように、高さ2.4m、幅(加振方向1m、加振直角方向0.5m)となる。制御装置は全モードの腹となる模型頂部に設置し、AMD(約10kgf)と総重量(約1tf)の重量比は約1/100となる。4枚の鋼製板ばね柱を用いた模型は制振効果を求めやすくするため、減衰を小さくし、高次の卓越振動数が20Hz以内に収まるように、座屈しない程度に柔らかくした。模型の動特性を求めるために、周期的 sweep 加振をrun down方式で16.5Hzから0.5Hzまで、0.1Hzきざみで行った。入力加速度振幅は20ガルとし、共振点近傍では0.05Hzきざみとしたときの共振曲線をFig. 2に示す。同図の1次の応答加速度倍率は大きすぎて実測できない。7, 8次の卓越振動数は位相がばらつくため、ピーク値も明確でないが、6次まで明確にピーク値を示し、全卓越振動数は、15Hz以内に収まる。そこで、この結果を用いて、振動論より得られるモード和の関数を回帰曲線として、非線形多重回帰により、共振曲線を構成する固有値と固有モードなどのモーダルパラメータを同定することにより求めた振動数応答曲線をFig. 3に示し、実験と同定による卓越振動数と減衰定数をTable 1に示す。同図は6次モードまで同定したもので、卓越振動数がかなりの精度で求められていることがわかる。

次に、ハードとソフトを組込んだ制振システムが正常に作動するかどうかを検討するため、制振装置のハードを構成するACサーボモータ(300W, 9.8kgf・cm)の時定数とボールねじを用いた伝達機構の性能を確認する。時定数(T)はモータの作動遅れを表わす定数のことで駆動装置としてサーボモータを用いているため、

通常の油圧ジャッキのように制御力を直接評価するのではなく、速度指令信号 ($\dot{y}^*$) と応答速度 ($\dot{y}_0$) の関係で評価する必要がある。制振装置への入力 ($\dot{y}^*$) と出力 ($\dot{y}_0$) の関係を 1 次遅れとすると $\dot{y}^* = \dot{y}_0 + T\ddot{y}_0$ … (1) で表わされる。T を求めるため、Fig. 1 の屋上部をとりだし、1 ～ 8 次の振動数成分を含んだ正弦波形状の速度信号を AC サーボドライバに入力する。AMD 部の応答速度の共振曲線 Fig. 4 に示す。同図は入力電圧 1V 時のボード線図で、ボールねじと駆動マス部に発生する摩擦などのため、作動時間の信号に対する遅れが少し生じていることがわかる。位相特性曲線から時定数 (T(sec)) を求めると 0.0015 (秒) となる。時定数が小さい程、遅れの少ない反応性の良い制御装置で、時定数の小さな装置は同じ指令速度に対して大きな加速度が得られる。今回の模型は良い制御性能を有しているといえる。全体の制御システムは式 (1) を構造物の状態方程式と連立させ、振動制御を行う。

3. 制振方法と制振効果

駆動マスの慣性力を利用し、模型建物の振動に応じ、振動を抑える方向に動く制御信号を発生する回路や DSP (Digital Signal Processor) などを模式的に Fig. 5 に示す。同図に示すように制御アルゴリズムは構造物の応答を次の制御力に反映させるフィードバック制御法の他に、振動台入力による地震動をサーボ型の加速度計で感知し、制御力に反映させるフィードフォワード制御法をフィードバックに併用して採用した。フィードバック制御法¹⁾は構造物の応答量のみで制御力を決定するもので、フィードバック係数は最適レギュレータ (構造物の振動エネルギーと外部から与える制御エネルギーの自乗和を最小化する) により算出する。この方式は入力を無視した解を用いるため、比較的簡便で安全性が高く、過去の実績も多い。しかし、8 質点の等価せん断ばねモデルで全モードを考慮すると、状態変数は各モードの速度と変位にモータの制御速度を加え 17 となる。実構造物を制御する場合には、各階の応答を全て測定して制御することは非現実的で、構造物を低次元化として限られた測点の応答をもとに行うことになる。そこで、第 1 段階として全自由度を用いる場合 (MCK と称し、運動方程式の M, C, K を解く。Modal と称し低次元化のためモード座標に変換して解く) と低次元化を行い、2 次モードまで用いた場合 (Modal 2nd) の制御実験例を示す。次に、フィードフォワード制御法では事前に模型の振動特性を制御回路に組み込み、その時刻より未来の入力時刻歴が必要となる。Yang²⁾ 提案の時間依存型の評価関数を用い、筆者らの一人が提案した状態量と制御量のクロスタームを評価関数に加え、入力する地震エネルギーを考慮する方法³⁾を用いる。フィードフォワード単独の制御は予測制御となるため、地震を受ける構造物の制振には不適当となり、フィードバックと併用した Closed Open ループ制御方式を用いる。この手法で、入力の項にかかる係数 α をゼロとした場合、フィードバックと同じになるため Closed ループと称して実験した。なお、同図の DSP は積和のマトリクス演算速度を早めるため、C 言語で書かれ、制御系の演算は全て DSP ですばやく処理される。DSP と D/A の間にチェビシェフフィルタ (0.2Hz ～ 40Hz) を使い、積分誤差などによる長周期成分と 400Hz の振動台の微動成分を削除した。また、AC サーボドライバのゼロボルト補正として、DSP の中で速度制御に対し、比例制御を行っている。

フィードバック制御に用いた応答速度の重みは [Q] は MCK で屋上から 1 階まで、10, 5, 5, 5, 4, 3, 2, 1, Modal 1 次から 8 次まで 10, 5, 5, 5, 4, 3, 2, 1, 2 層, 5 層, 屋上の 3 点計測の Modal 2nd で、1 次と 2 次を 10, 5 とし、いずれも応答変位は 10 倍した。制御量の重み [R] は [Q] に対し、0.005 から 0.05, 0.5 と変化させ 0.1 まで求めた。次に、Closed Open ループと、 α をゼロにした Closed ループの応答速度の [Q] は屋上から 1 階まで 100, 50, 50, 50, 50, 0, 0, 0 とし、応答変位は 100 倍した。 α/R の値は予備解析で、AMD がいくらか振動してもよいとして、最適な比を求めると Fig. 6 のように 40 近傍となるため、[R] は 0.66 とし、 α は 26.6 とした。

[R] を変えた実験によりフィードバック制御時、最良の [R] は MCK で 0.05, Modal で 0.005, Modal 2nd で 0.01 となるため、代表例として、これらの結果を Fig. 7 に示す。同図は制御の効果を表す指標として、最大応答速度でなく、全制御時間における速度振幅の自乗平均値の平方根 (RMS 値と称す) を用いている。同

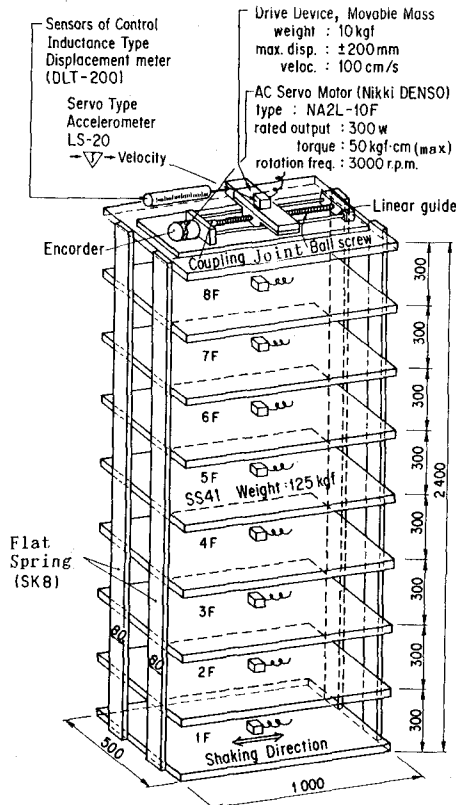


Fig.1 Multistory Building Model with Control System (an Active Control Damper System)

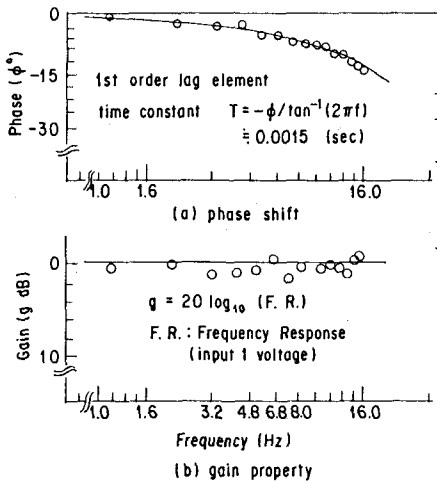


Fig.4 Time Constant of AC Servo Motor

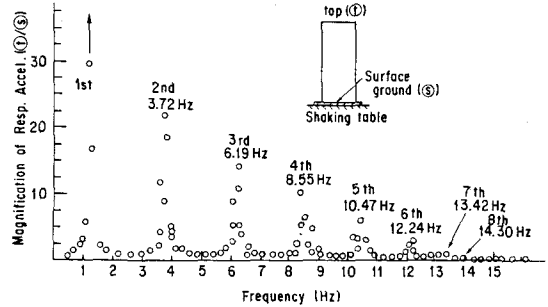


Fig.2 Frequency Response Curve by Continuous Swept Motion (20cm/s²)

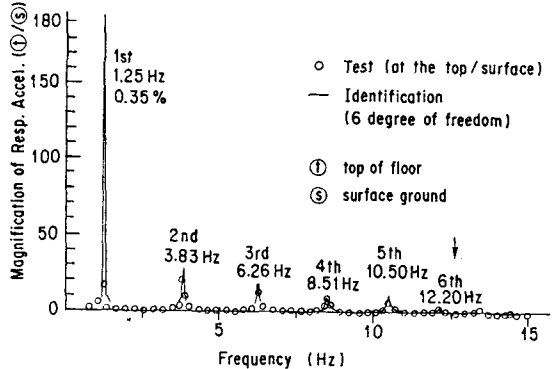
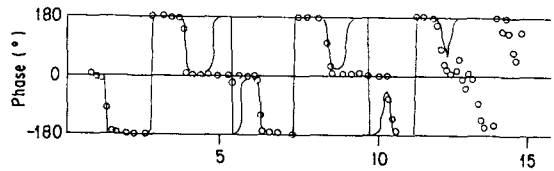


Fig.3 Curve Fit of Identification

Table1 Dynamic Characteristics of 8 Story Model

	Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
T	Natural Frequency (Hz)	1.25	3.72	6.19	8.55	10.47	12.24	13.42	14.30
I	Natural Frequency (Hz)	1.25	3.83	6.26	8.51	10.50	12.20	—	—
	Damping Ratio (%)	0.35	0.56	0.56	0.58	0.54	0.52	—	—

T : Test Result

I : Identification of Modal Constant from Resonance Curve

参考文献

- 1) 大塚 将, 川井伸泰, 安井健治, 吉川正昭: 転がり振り子による制振システム—パッシブからアクティブ制振への移行—, 振動制御コロキウム (第2回) 講演論文集, 土木学会構造工学委員会 (1993.8) (投稿中)
- 2) Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami P.: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 9, PP. 1369 ~ 1386 (1987)
- 3) Tadanobu Sato, Kenzo Toki and Kazuhisa Sugiyama: Optimal Control of Seismic Response of Structures, SEE, JSCE, Vol. 7, No. 1, PP. 179s ~ 188s (1990.4)

図より, 無制御時に比べ, 制御すると約80%応答速度が低下することがわかる. 次に, 振動に要するモータのエネルギーと制御則の違いによる制御効果を調べるため, [R]を変えたときの全質点の応答速度のrms値を入力地震波のrms値で基準化した値とAMDの速度のrms値をFig. 8に示す. 横軸のAMDの速度を制振に必要な入力エネルギーとみなせるため, 同一入力エネルギーに対する各アルゴリズムによる応答結果を

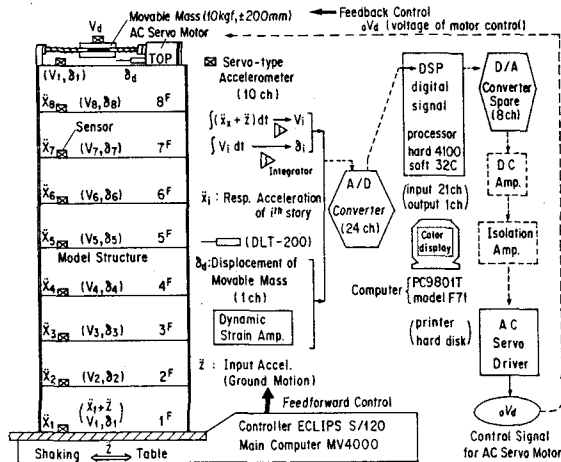


Fig. 5 Schematic of Control System

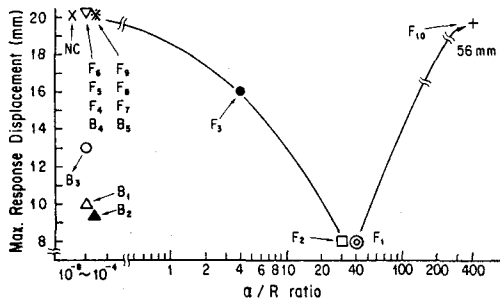


Fig. 6 Relationship between α/R and Max. Resp. Displacement

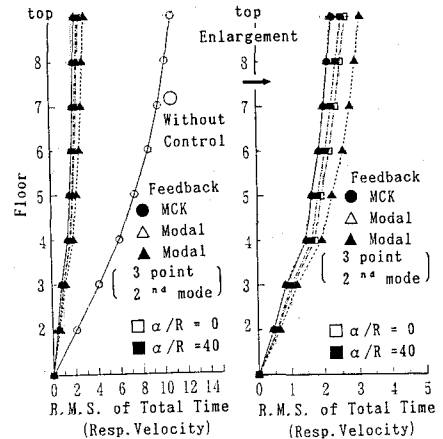


Fig. 7 Velocity (R.M.S.) by Different Control Algorithms

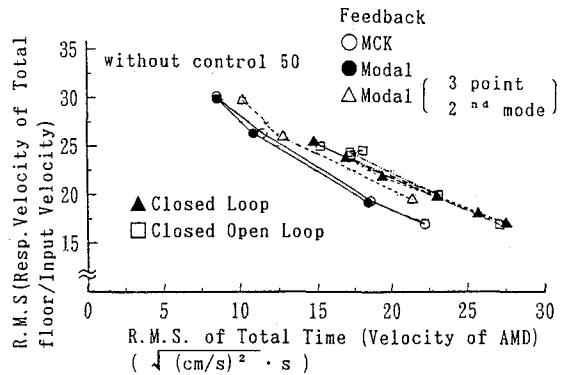


Fig. 8 Energy of AMD and Response Value

比較すると、現状では最適フィードバックに基づく制御がエネルギー効率がよい。

4. まとめ

8階建模型にAMD を用いた振動台実験の結果に考察を加えたところ、AMD の装置に用いる制御アルゴリズムや仕様決定に供する基礎資料を得ることができた。これらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) 模型建物の応答加速度の共振曲線の 7, 8 次共振ピークは小さいが、6 次の共振ピークまで明確に求められる。6 次までの固有周期を高精度で同定でき、1 次の卓越振動数は 1.25 Hz、減衰定数は 0.35% となる。
- (2) 制御装置の作動遅れを表わす時定数は 0.0015 秒と小さく、AC サーボモータとボールねじを用いた伝達機構の性能が良いため、AMD-模型建物を用いて効率のよい制御が行える。
- (3) 応答速度と変位と制御量に適切な重みを与え、フィードバック制御則などを用いて制御した場合の振動台実験結果による応答速度の自乗平均値の平方根は無制御時に比べて、約 80% 低下する。
- (4) 今回の実験で、同一入力エネルギーに対する制御効果は、フィードバック制御 (Closed ループ) の方が入力地震を考慮した閉開ループ制御 (Closed Open ループ) より、応答速度の自乗平均値の平方根が小さくなる。Closed Open ループに対する最適な重み係数が Closed Open ループのように求められていないためと考えられ、今後さらに追及する。

5. あとがき

入力加振による自由振動波形の 1 次減衰定数は加振実験時より小さく約 0.27% となり、模型建物は非常に揺れやすく、逆に制御の効果が求めやすくなっている。そのため、模型から実物への相似則は考えていない。小型実物による制振効果を求めている。