

I - 1 制御系構造物の地震応答解析

高知高専建設システム工学科 吉川 正昭
株式会社 第一コンサルタンツ ○谷脇 弘規

1. はじめに

近年の建築・土木技術の進歩により、一方では構造物の巨大化が可能となり、他方、構造物の基礎も、これまでとは適地とはされなかった軟弱地盤や斜面地形などにも拡大された。当然、それら構造物は地震動に対する減衰性が低く、繰り返し外力による動的応答倍率も高くなり、そのためにさまざまな手法の振動制御が必要となってきた。剛構造に対しては免震が有効であり、柔構造に対しては、ハイブリッド型や可変剛性・減衰型が有望であると考えられる。

そこで本研究では、Yang の時間依存型評価関数¹⁾をもとに、構造物に入力される地震動のエネルギーを評価関数に導入して定式化を行い、制御量に状態量だけではなく外力も考慮できる閉ループ制御則^{2) 3) 4) 5)}を用いて AMD(Active Mass Damper)⁶⁾を制御した場合の制御効率についてケーススタディを行い、無制御時や従来の閉ループ制御則との比較を行った。

2. 解析手法と解析条件

アクチュエータを最上階に 1 台設置した n 自由度系の構造物モデルの運動方程式は表-1 の式(1.1)で表され、 $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ はそれぞれ質量、剛性、減衰マトリクスで、 $n \times n$ 次元の正方マトリクスであり、 $x_i (i=1, \dots, n)$ は各質点の相対変位、 u は制御力である。 $\{H\}$ は制御力の作用位置を表す n 次元ベクトルで、アクチュエータにより発生する制御力 u が最上階にのみ作用するため $\{1, 0, 0, \dots, 0\}^T$ で与えられる。運動方程式を状態方程式に変換すると式(1.2)となる。さらに式(1.2)を状態方程式に書き直すと式(1.3)となる。評価関数は 2 次形式として式(2.4)のように定義する。最適制御入力とは式(1.3)の運動方程式の条件のもとで式(1.4)の評価関数を最小化する変分問題を解くことにより求められるフィードバック係数($\{F_{BD}\}$ 、 $\{F_{BV}\}$)を求めて応答計算を行い、フィードバック量および構造物の応答特性を評価する。

閉ループ制御則の定式化としては、地震動の特性を直接反映できる制御則を導くため、構造物に入力される地震エネルギーを考慮した評価関数が提案されているので、修正して式(1.5)の評価関数として定義する。最終的に式(1.6)の形にまとめられる。

8 階建て入力モデルと質量、剛性を図-1 に示す。入力地震波は、図-2 に示す芸予地震（最大加速度 100.6gal、継続時間 10sec、きざみ 0.01sec、卓越周期 6.0Hz）を用い、地表面から入力した。また、ケーススタディ 1 3 種類を表-2 に示す。対象構造物は 1 次の 1.25Hz 付近ほどよく揺れる。

表-1 評価関数

$$[M]\ddot{x}(t) + [C]\dot{x}(t) + [K]x(t) = -[m]\ddot{X}_0(t) + \{H\}u(t) \quad (1.1)$$

$$\{x(t)\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + W_1\ddot{X}_0(t) \quad (1.2)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\ddot{Y}_0 \quad (1.3)$$

$$J = \int_0^T [x(t)^T Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt + x^T(t_f)P_f x(t_f) \quad (1.4)$$

$$J(t) = \int_{t-\Delta t}^t [z(\tau)^T Qz(\tau) + u^T(\tau)Ru(\tau) + \alpha \{-\dot{x}^T(\tau)\{m\}\ddot{X}_0(\tau)\}]d\tau \quad (1.5)$$

$$u(t) = \{F_{BD}\}\{x(t)\} + \{F_{BV}\}\{\dot{x}(t)\} + F_f\ddot{X}_0(t) \quad (1.6)$$

$$\{F_{BD}\} = -\Delta t / 4r \{m^{-1}\{H\}\}^T [Q_{21}^T + Q_{22}]$$

$$\{F_{BV}\} = -\Delta t / 4r \{m^{-1}\{H\}\}^T [Q_{22}^T + Q_{22}]$$

$$F_f = \Delta t^2 / 8 \cdot \alpha / r$$

3. 解析結果と考察

本研究結果を、ケーススタディごとの最大応答包絡線分布を比較し、要約すると以下のようなものである。

- i) 閉ループ制御では、図-3 に示すように α （入力地震波にかかる重み）を 0 にし、 R （制御力にかかる重み）を大きくすると、応答加速度は小さくできるが、応答変位は大きくなることがわかった。
- ii) $\alpha/R=30$ と一定にして R を小さくすると、閉ループ制御則の Pade 近似による解析では、図-4 に示すように応答変位は小さくできるが、応答加速度にはあまり変化がなかった。一方、固有値による解析では同条件の時、図-5 に示すように R を 10^6 まで小さくするよりも、 10^7 にしたほうが応答加速度も応答変位もよく制御できることがわかった。
- iii) 閉ループ制御では、図-6 に示すように $\alpha/R=1/30$ と一定にして R を小さくすると、応答加速度、応答速度、応答変位のすべてを小さくできることがわかった。

今後の課題としては、最適な制御ができるように、更に細かく重みを変えてパラメトリックスタディを行う必要がある。

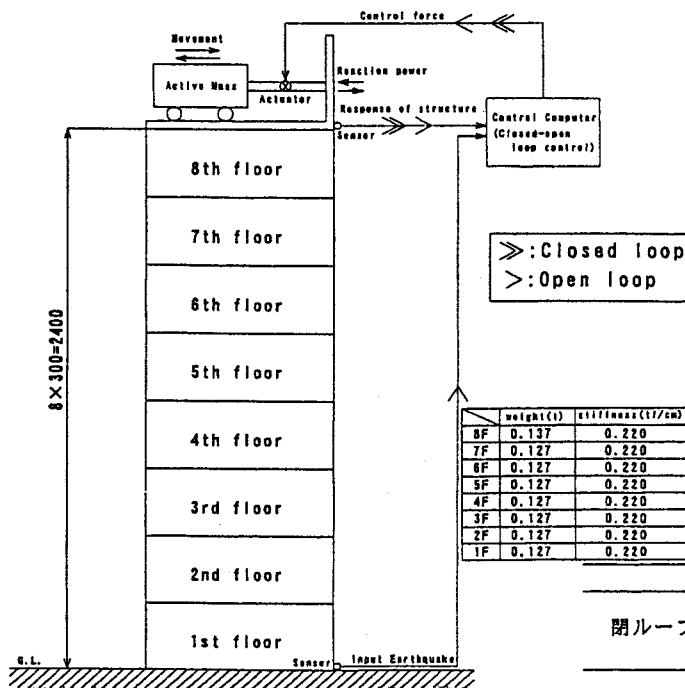


図-1 入力モデル

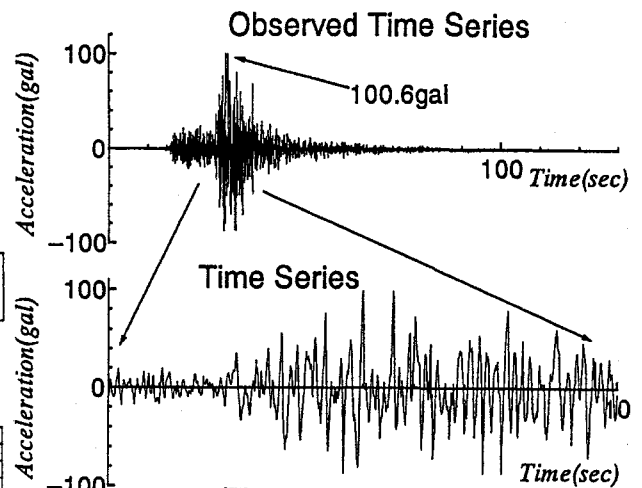


図-2 入力地震波

表-2 ケーススタディ

	case	R	α	Q
閉ループ制御	case 1	10^8	0	10^3
	case 2	10^7	0	10^3
	case 3	10^6	0	10^3
閉開ループ制御	case 4	10^8	3×10^9	10^3
	case 5	10^7	3×10^8	10^3
	case 6	10^6	3×10^7	10^3
閉開ループ制御	case 7	3×10^9	10^8	10^3
	case 8	3×10^8	10^7	10^3
	case 9	3×10^7	10^6	10^3
閉開ループ制御	case 44	10^8	3×10^9	10^3
	case 55	10^7	3×10^8	10^3
	case 66	10^6	3×10^7	10^3
制御なし	case 0	0	0	0

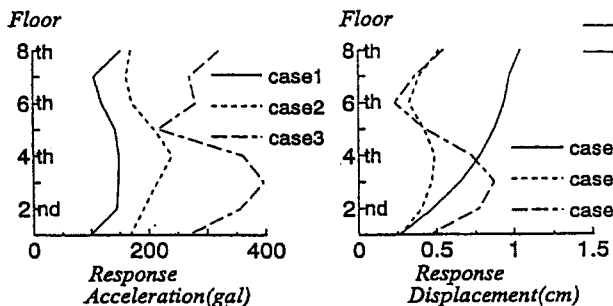


図-3 最大応答包絡線分布

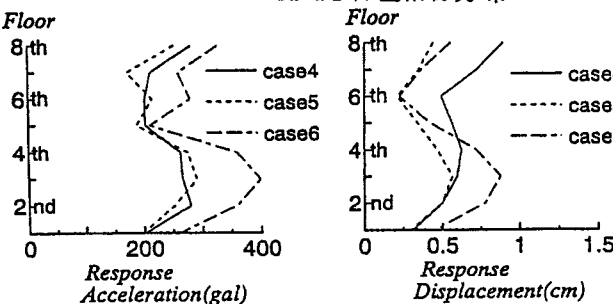


図-4 最大応答包絡線分布

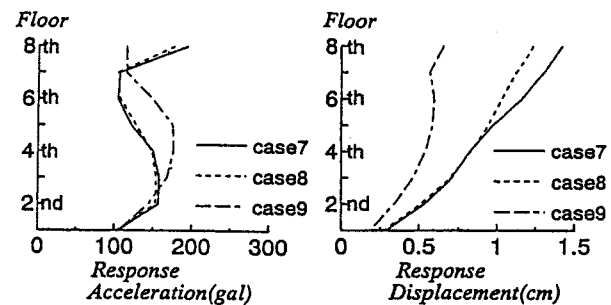


図-5 最大応答包絡線分布

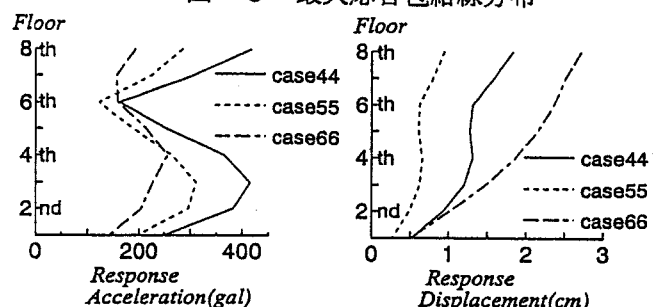


図-6 最大応答包絡線分布

参考文献

- 1) J.N.Yang : New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol.113, No.9, pp.1369~1386, Sep. 1987.
- 2) 吉川正昭 : 可動質量型制振装置を用いた構造物の閉開ループ震動制御, 土木学会論文集, No.525/I-33, 201~211, 1995.10.
- 3) 吉川正昭, 川井伸泰 : 転がり振り子による制振-可変ゲイン制御による制振効果-, 土木学会構造工学委員会, pp.99~106, 2002.5.
- 4) 吉川正昭, 尾崎修一 : AMD を用いた地震応答解析, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp.58~59, 2002.5.
- 5) 土岐憲三, 佐藤忠信, 望月俊宏, 〇吉川正昭, 栗本雅裕, 稲葉金正 : AMDによる模型構造物の地震応答制御, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.1921~1926, 1994.12.
- 6) 吉川正昭, 竹内光生 : 構造物の Active Mass Driver による制振, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp.84~85, 1996.5.