

(4) パッシブ・アクティブ・ハイブリッド手法 による曲げ構造物の制振効果に関する考察

Efficiency of Passive, Active and Hybrid Control Techniques
on Random Response of Flexible Structures

山田 善一*, 家村 浩和**, 伊津野 和行***, 米山 治男****
Yoshikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Kazuyuki IZUNO, Haruo YONEYAMA

To reduce dynamic response of flexible structures, there are passive, active, and hybrid control methods. In this study, these control methods are applied to multi-degree-of-freedom flexible flexural structures. Tuned mass, moving mass, active mass are used for passive, active and hybrid control methods, respectively. The effects of these control methods on dynamic response of a cantilever flexural structure are compared in terms of the trade-off curves between control force and structural vibration energy, and also time history response. As a result, efficiency of the hybrid control method is verified.

KEYWORDS: Flexural Structure, Random Vibration, Hybrid Control, Efficiency, Trade-off, Passive Control, Active Control

1. まえがき

制振の手法は、大別してパッシブコントロールという受動的制御手法とアクティブコントロールという能動的制御手法に分けられる。パッシブコントロールは、構造物が外乱と共振を起こさぬよう、あらかじめ剛性、減衰等を調整した装置を取り付けるものであり、外部からのエネルギー供給がないものである。しかしこの方法には、1つの対象振動数にしか適用できない、長大構造物に対しては大きな補助質量が必要であるなどの欠点がある。これに対してアクティブコントロールは、外乱や構造物の振動をセンサーによって検出し、その信号を制振のための制御信号として用い、外部より制御力を与えることによって構造物の応答を能動的に低減する方法である。この方法の短所として、大型な構造物に対してはアクチュエータ駆動力が非常に大きい値になる、制御装置に故障が発生した場合の対策が講じられないなどがある。このような2つの制振方法の短所を克服する目的で、両者を組み合わせたハイブリッドコントロールが考案された。この方法は、アクティブコントロールと比較して、小さい制御力でなおかつ制振効果を高める可能性があり、パッシブコントロールと比較しても、広範囲の入力振動数に対応できると考えられている。

本研究の目的は、卓越振動数を有する不規則振動を受けたフレキシブルな曲げ構造物の共振的な動的応答を低減する制御手法として、前述の各種制御手法を定量的に比較検討し、ハイブリッドコントロール手法の有効性を示そうとしたものである。

2. 構造物と各種制振力のモデル化

2.1 構造物のモデル化

本研究では、解析構造物として Fig.1 のような多自由度系のタワーを採用した。自由度の縮小のため、梁軸に対して垂直方向のみに振動するとしている。まず、梁要素のみでの運動方程式を作り、次に付加的なマス

* 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

*** 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

**** 工修 運輸省港湾技術研究所研究員

や構造要素を組み合わせ、各コントロールを行うときの運動方程式を作成する。パッシブコントロールの場合には、一般的な運動方程式と同一の形となるが、アクティブコントロールやハイブリッドコントロールの場合には、制御の形式に対応して行列 D を定めることができ、制御力をも含めた運動方程式が

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = Du - m\ddot{z} \tag{1}$$

ただし、 $u(t)$: 制御力ベクトル (m 次元)、 $y(t)$: 変位ベクトル (n 次元) と書かれる。コントロール手法については、3. において説明することにする。

2.2 TMDによるパッシブコントロール

前節で構成した各種構造特性マトリックスに、Tuned Mass Damper を導入することにより、梁構造物のパッシブコントロールシステムを示すことができる。Tuned Mass Damper に対応する質量、剛性、減衰マトリックスは次のようになる。

$$[M_T] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix}, \quad [K_T] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}, \quad [C_T] = \alpha_2[M_T] + \beta_2[K_T] \tag{2}$$

ただし、
 m_T, k : Tuned Mass Damper の質量、剛性
 α_2, β_2 : Tuned Mass Damper の質量比例分および剛性比例分の減衰係数

これらの各構造マトリックスをタワーの構造マトリックスと組み合わせて、パッシブコントロールを含む構造系を作ることができ、(1) 式で示した運動方程式が求められる。ここで Tuned Mass Damper の質量は、構造物の構造特性を大きく変えるほどで無いことが望ましいし、剛性は、構造物の固有振動数と同調させたものを使用する必要がある。さらに減衰定数 α_2 および β_2 においては、制振効果を最も高める最適値が存在する。した

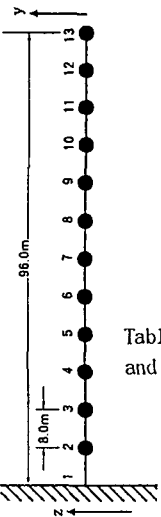


Fig.1 Model of Cantilever Beam

Table 1 Dimensions of Cantilever Beam

Symbol	Parameter	Remarks
L	96.0m	梁の全長
M	480.0ton	梁の全質量
I	1.0m ⁴	断面2次モーメント
E	21000000.0ton/m ²	ヤング率
ω	5.0ton/m	単位長さあたりの質量
α_1	0.01	質量比例分減衰定数
β_1	0.003	剛性比例分減衰定数

Table 2 Natural Periods and Participation Factors

Mode	T (sec)	Factor
1	2.33603	16.900
2	0.37781	-9.434
3	0.13656	5.631
4	0.07068	-4.188
5	0.04349	3.478

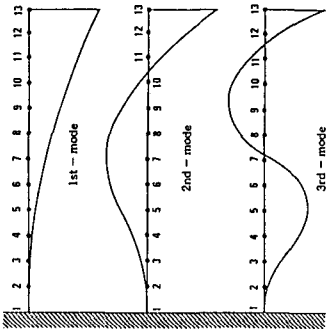


Fig.2 Vibration Modes

Table 3 Dimensions of Tuned Mass Damper

	TMD	AMD	HMD	
Symbol	Parameter			Remarks
m	9.6ton	9.6ton	9.6ton	質量
k	5.5ton/m		7.1ton/m	剛性
α_2	0.10			質量比例分減衰係数
β_2	0.15			剛性比例分減衰係数

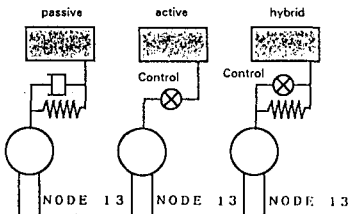


Fig.3 Control Systems Used in This Study

がって本研究では、 α_2 を一定として β_2 を変化させることにより、ダンパーを取り付ける節点の周波数応答関数からその値を決定することにする。

3. 最適制御理論によるアクティブおよびハイブリッドコントロール

3.1 卓越振動数を有する地動のモデル化

卓越振動数を持つ不規則地震動をモデル化するには、それが何らかのフィルターを通過したホワイトノイズであると考えたと最適制御則を有効に展開できる。このとき、入力のスpekトルの特性はフィルターの伝達関数によって規定される。ここでは、1自由度振動系フィルターを地盤のモデルとして考えることにする。

仮想的なフィルターへの入力を $w(t)$ とすると地盤の運動方程式は、

$$\dot{z} = A_z z + G_z w \quad (3)$$

ただし、

$$z = \begin{pmatrix} z \\ \dot{z} \end{pmatrix}, \quad A_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g\omega_g \end{pmatrix}, \quad G_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

このような形式で書いた運動方程式は、状態方程式と呼ばれる。また、 z は状態ベクトルと呼ばれる。

3.2 最適制御則

この構造物の状態方程式に地動のフィルター方程式(3)式を代入し、構造系と地動フィルターを一括して表示すると、次の方程式となる。

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{G}w(t) \quad (4)$$

ただし、

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} A & GD_z \\ 0 & A_z \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{pmatrix} G \\ G_z \end{pmatrix}$$

このような系に対し、次の評価関数

$$J = E[\bar{x}^T \bar{R}_1 \bar{x} + u^T R_2 u] \quad (5)$$

を最小にするような $u(t)$ を求める問題を考える。ただし、 R_1 、 R_2 は適切な重み行列であり、 R_1 は半正定な $(2n \times 2n)$ 行列、 R_2 は正定な $(m \times m)$ 行列である。

上式で定義された J を最小にするような u を求める問題は確率論的最適レギュレータ問題と呼ばれ、その解は次のようになることがすでに導かれている。行列 P について

$$\bar{R}_1 - P\bar{B}R_2^{-1}\bar{B}^T P + \bar{A}^T P + P\bar{A} = 0 \quad (6)$$

を解く。上式は行列 Riccati 方程式と呼ばれている。この解 P は唯一ではなく、ここではそれらのうちの正定対称解を用いる。すると J を最小にするような $u(t)$ は

$$u(t) = -R_2^{-1}\bar{B}^T P\bar{x}(t) = \bar{F}\bar{x}(t) = \begin{pmatrix} F_x & F_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

という形式で得られることがわかる。この式から最適制御は、構造物の応答値によるフィードバック制御に加え、地盤の変位、速度によるフィードフォワード制御を併合することによって実現されるということである。

3.3 構造物の振動エネルギーと制御力のトレードオフ

アクティブコントロールあるいはハイブリッドコントロールによる制振性能の大きさを評価するための1つの指標として、ここでは構造物の弾性振動エネルギー E_S の期待値 $\bar{E}_S$ 、つまり

$$\bar{E}_S = E[1/2\dot{y}^T M_S \dot{y} + 1/2y^T K_S y] \quad (8)$$

を取りあげてみることにする。 K_S および M_S はそれぞれ、梁の質量マトリックス、梁の剛性マトリックスである。また、制御力の大きさを示す指標として、その分散を採用することにする。本研究では、制御力 u を1つであるとしているので、(付加質量に作用している制御力は、梁に作用している制御力と同じものである。) その u の値をスカラーであるとして、その分散を q_u とする。制御力の大きさは、分散 q_u 、あるいはその標準偏差 σ_u を用いて、

$$q_u = \sigma_u^2 = E[u^2] \quad (9)$$

と表せる。

さて、構造物の弾性振動のエネルギー $\bar{E}_S$ を小さくすることは、構造物を制振する目的に一致する。しかし、構造物の振動エネルギーを小さく制御すれば、逆に制御力は過大なものになるであろう。また、小さい制御力で済まそうと考えれば、振動エネルギーは大きくなってしまいうであろう。このような状態にある2つの値 q_u と $\bar{E}_S$ は、トレードオフの関係にあるといえる。

4. 数値計算例

4.1 構造物および制御機構のモデル化

本研究では、解析対象構造物として、Fig.1 に示す12 質点系タワーモデルを採用した。同モデルの諸元を Table 1 に、各次振動モードを Fig.2 に、さらにそれらの固有周期および刺激係数を Table 2 に示す。同表より、低次の複数モードの振動が比較的発生しやすい構造形式であることが判る。

構造物モデルの節点に作用させるパッシブ、アクティブおよびハイブリッドの制御機構を概念的に示したのが、Fig.3 である。以後、これらのコントロール機構を総称する場合には、ダンパーと表記することにする。

TMD の設計に当たっては、TMD の振動周期を構造物モデルの1次周期に一致させるとともに、減衰係数の決定に当たっては、Fig.4 に示す構造物先端(Node13)の共振ピークが出来るだけフラットになるように $\beta_2 = 0.15$ を選定した。各種パラメーターを Table 3 に示す。

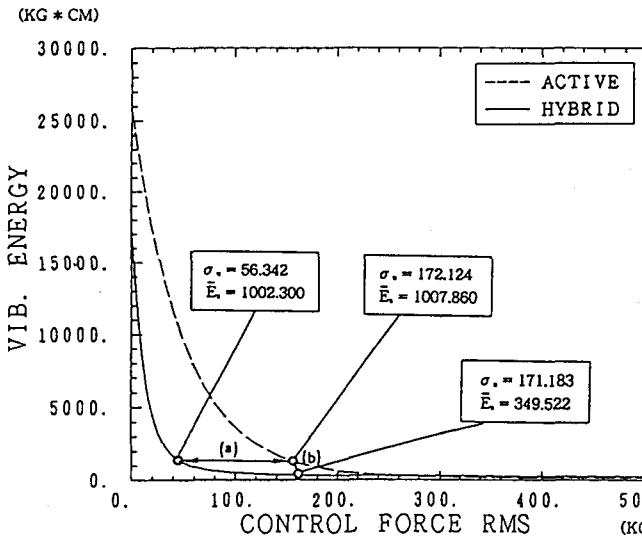


Fig.6 Selected Design Points for Comparison

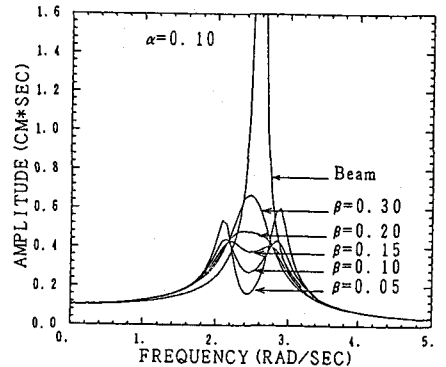


Fig.4 Frequency Response Function

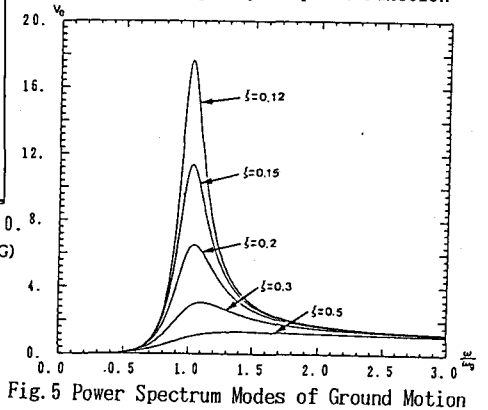


Fig.5 Power Spectrum Modes of Ground Motion

4.2 入力地震動

卓越振動数を有する地動のパワースペクトルの形状を示したのがFig.5である。1自由度系振動フィルターの減衰定数 ζ_g を変化させることにより、卓越振動数付近におけるスペクトル特性のシャープさを表現できる。本研究では、構造物の1次固有振動数と同じ卓越周期を有し($\omega_g = 2.7\text{rad/sec}$)、比較的滑らかなピークを有する($\zeta_g = 0.2$)人工地震波形(type A)、および構造物の2次固有振動数と同じ卓越周期を有する地震波形(type B, $\omega_g = 16.6\text{rad/sec}$, $\zeta_g = 0.1$)を採用した。卓越振動数などの異なる人工地震波形についても応答のシミュレーションを行っているが、紙面の都合上割愛する。

4.3 各種制御機構による制震効果の検討

4.3.1 トレードオフ曲線

アクティブコントロールとハイブリッドコントロールによる制振効果を比較するために、前節に示した構造物とtype Aの入力地震動のモデルに関する両者のトレードオフ曲線をFig.6に示した。

制御力が比較的小さい領域においては、ハイブリッドコントロールが有効に作用し、構造物の振動エネルギーをアクティブコントロールのそれよりもかなり低くしていることが判る。特にハイブリッドコントロールは、制御力が作用しない場合でも、制振効果のあることを示している。制御力を上げて、構造物の振動エネルギーを極めて低いレベルに下げると、ハイブリッドとアクティブの両者の効果に差が無くなる。またハイブリッドコントロールにおいて、制御力があるレベルに達するまでは、構造物の振動エネルギーを極めて有効に減少させるが、その点以降では制御効率が急激に悪化することが判る。これらの制振効果の物理的な原因を追求するために、応答シミュレーションを行った。

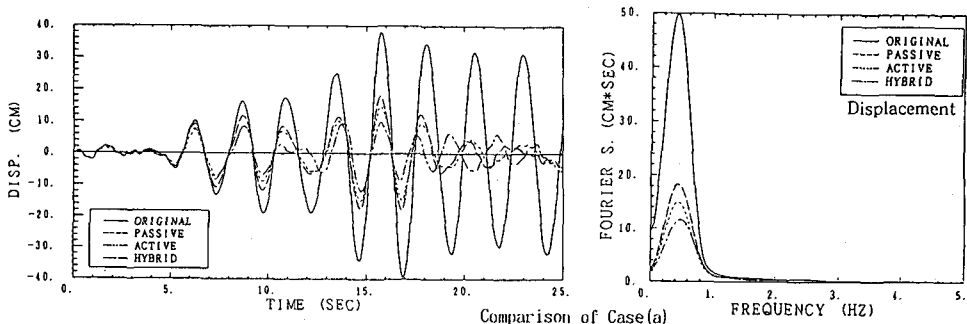


Fig.7 Displacement Response

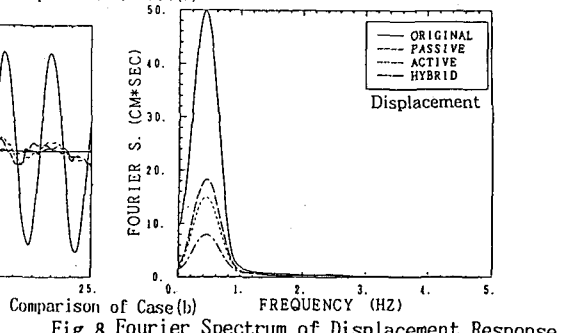


Fig.8 Fourier Spectrum of Displacement Response

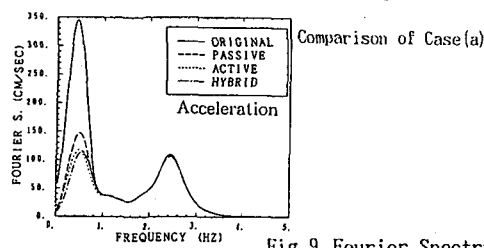


Fig.9 Fourier Spectrum of Acceleration Response

4.3.2 不規則地震応答のシミュレーション

Fig.6 において、振動エネルギーはほぼ同一であるが制御力の異なる場合の比較(これをケース(a)の比較とする)、ならびに制御力はほぼ同一であるが振動エネルギーの異なる場合の比較(これをケース(b)の比較とする)の注目点を示した。これらの注目点に対応する不規則地震応答シミュレーションの結果を示したのが Fig.7 ~ 11 である。Fig.7 には変位応答曲線を、Fig.8 には変位応答のフーリエスペクトルを、Fig.9 には加速度応答のフーリエスペクトルを各々示した。応答計算は構造物のみの場合、パッシブ、アクティブ、ハイブリッド制御を実施した場合の4種について行い、構造物の先端(Node13)における結果を図示してある。また各図において、ケース(a)の場合の比較とケース(b)の場合の比較を示した。

変位応答曲線においては、1次振動モードの成分のみが卓越している。一方、加速度応答においては、2次モードの成分もかなりのウェイトを占めている。制御力が等しい場合のケース(b)の比較を見ると、1次モードの振動制御に関しては(Fig.8(b))、パッシブコントロールがアクティブコントロールにかなり近い制振効果を有していることが判る。またハイブリッドコントロールは、1次および2次モードの振動を極めてよく制御していることが、Fig.9(b)より確認できる。

さらに、ケース(a),(b)の比較における制御力波形の差を示したのが Fig.10、そのフーリエスペクトルを示したのが Fig.11 である。ケース(a)の比較において、アクティブおよびハイブリッドコントロール共に構造物の1次振動モードに対応した制御力の波形となっているのに対し、ケース(b)の比較におけるハイブリッドコントロールでは、1次および2次の両者に対応した、広振動数領域の制御力波形を示している。

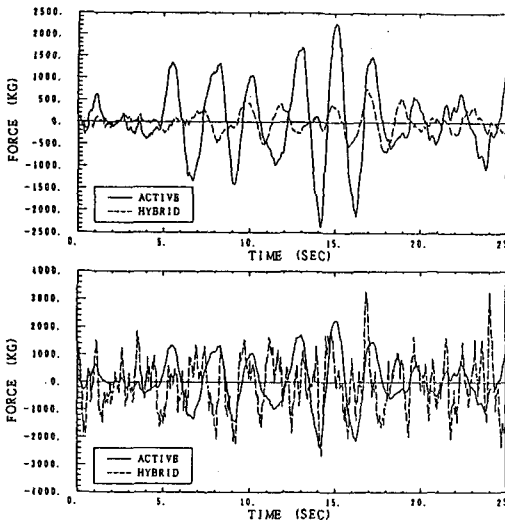


Fig.10 Simulated Control Force

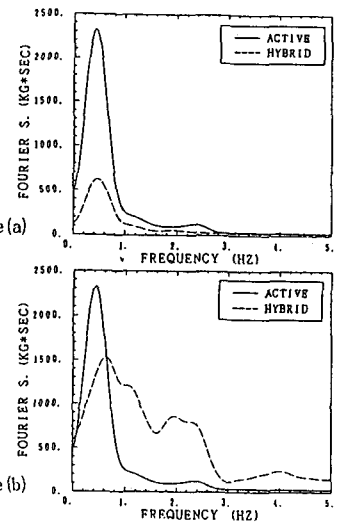


Fig.11 Fourier Spectrum of Control Force

謝辞

本文を取りまとめるに当たり協力を得た京都大学大学院修士課程学生馬場賢治君に感謝する次第である。

参考文献

- (1) Yong, J.N. and Daniehians, A., Aseismic Hybrid Control Systems, Proceedings of the U.S. National Workshop on Structural Control Research, (1990), p.241.
- (2) Chassiakos, A.G., Masri, S.F., Bekey, G.A. and Miller, R.K., Optimum Controller Location For Mitigating Earthquake Induced Response Of Structures Provided With Point Actuators, Proceeding Of Ninth World Conference Of Earthquake Engineering, 5, (1988), p.865.
- (3) 五十嵐晃, 確率論的規範に基づく構造物振動のアクティブコントロール, 京都大学提出修士論文, (1988).
- (4) 家村浩和, 構造物の制御研究に関する米国ワークショップに参加して, 日本地震工学振興会ニュース, 115, (1990), p.18.