

(144) 不規則曲げ振動する構造物の ハイブリッドコントロールと制御位置

運輸省港湾技術研究所

米山治男

京都大学工学部

家村浩和, 山田善一, 伊津野和行

1. まえがき

制振の手法のうち、パッシブコントロールにおいては、単一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。一方、アクティブコントロールの短所としては、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、小さい制御力で高い制振効果を得られる可能性があり、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。

2. 構造物、各種制振力と地動のモデル化

2.1 構造物、各種制振力のモデル化

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片持ち梁を採用した。自由度の縮小のため、梁軸に対して垂直上下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。

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

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

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。パッシブコントロールの場合は、Tuned Mass Damper に対応する質量、剛性、減衰マトリックスを構造系の運動方程式に組み込んで式 (1) のように表現できる。

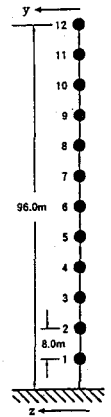


Fig.1 Model of Cantilever Beam

2.2 卓越振動数を有する地動のモデル化

1つの卓越振動数を持つようなパワースペクトルが一様でない確率過程を扱うには、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ると都合がよい。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、

$$\dot{z} = A_z z + G_z w \quad (2)$$

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. 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 最適制御則

構造系と地盤の運動方程式を一括して表せば、

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{G}w(t) \quad (3)$$

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

$$J = E[\bar{x}^T \bar{R}_1 \bar{x} + u^T R_2 u] \quad (4)$$

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

$$\bar{R}_1 - P \bar{B} R_2^{-1} \bar{B}^T P + \bar{A}^T P + P \bar{A} = 0 \quad (5)$$

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

$$u(t) = -R_2^{-1} \bar{B}^T P \bar{x}(t) = \bar{F} \bar{x}(t) = \begin{pmatrix} F_x & F_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (6)$$

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。

3.2 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

$$\bar{E}_S = E[1/2 \dot{y}^T M_S \dot{y} + 1/2 y^T K_S y] \quad (7)$$

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、

$$q_u = \sigma_u^2 = E[u^2] \quad (8)$$

と表せる。

ここで、多自由度構造物に対し、1つの制御力を作用させる場合を考えてみる。このとき、構造物の振動エネルギーを最小にするような、制御力の最適な作用位置があるということは直感的にわかる。もしも、制御力が構造物振動を最も低減させる位置に作用しているならば、トレードオフ曲線は下方に下がると考えられる。また、制御力の作用位置が適切でない場合には制振が効率的に行われず、トレードオフ曲線は上方に移動するであろう。したがって、制御力の作用位置を変化させることによる、構造物振動の制振性能の評価を行うためには、トレードオフ曲線を利用すればよいといえる。

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 質点系持ち梁モデルを採用した。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。

Table 1 Dimensions of Model

Symbol	Parameter	Remarks
L	96.0m	梁の全長
M	480.0ton	梁の全重量
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
$\alpha 1$	0.01	質量比例減衰係数
$\beta 1$	0.003	剛性比例減衰係数

Table 2 Natural Periods and Participation Factor of Model

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

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の振動周期を地動の卓越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、共振ピークが出来るだけフラットになるように β を選定した。各種パラメーターをTable 3に示す。

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.4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。卓越振動数などがさらに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 制御位置が制震効果に及ぼす影響

4.3.1 Type A 地震入力の場合

入力地震波形の卓越周期が、構造物の1次固有周期に一致する場合(Type A)のトレードオフ曲線を、制御位置ごとに示したのが、Fig.5である。同図(a)にアクティブコントロールの場合、同図(b)にハイブリッドコントロールの場合を図示してある。制御位置は、最上端のノード13から11,9,7,5と変化させている。

アクティブコントロールの場合、制御力が零であると、制御位置に関係なく構造物の振動エネルギーそのものの値となる。制御力を拡大させて行くと、構造物の振動エネルギーは、ほぼ単調に減少していくが、制御の位置が構造物の上端であるほど、有効な制御結果となっている。この理由としては、入力地震動の卓越周期が構造物の1次固有周期に等しいから、構造物の振動エネルギーはそのほとんどが1次モード成分であり、従って、1次振動モードをより有効に制御できる位置が、より効率的な制御効果を発揮するものと考えられる。

一方ハイブリッドコントロールでは、制御力が零の場合でもパッシブコントロールによる制御効果が存在する。いずれの制御位置でも、制御力が小さい範囲では構造物の振動エネルギーの減少率が極めて大きいが、その後減少率は急激に変化する。この領域では、制御効果はアクティブコントロールとさほど変わらない。

4.3.2 Type B 地震入力の場合

入力地震波形の卓越周期が、構造物の2次固有周期に一致する場合(Type B)のトレードオフ曲線を示したのがFig.6 (a),(b)である。制御位置としては、最上端のノード13から4番目までの全てをカバーしている。

Table 3 Dimensions of TMD,AMD and HMD

	TMD	AMD	HMD	
Symbol	Parameter			Remarks
m	9.6ton	9.6ton	9.6ton	重量
k	5.5ton/m		7.1ton/m	剛性
α 2	0.10			質量比例減衰係数
β 2	0.15			剛性比例減衰係数

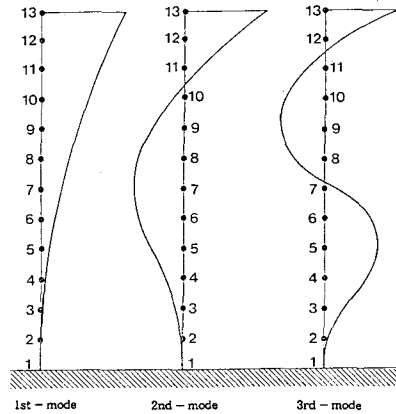


Fig.2 Vibration Mode of Cantilever Beam

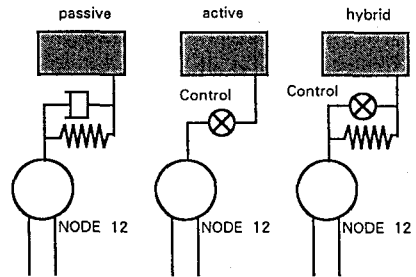


Fig.3 Model of Three-type Control System

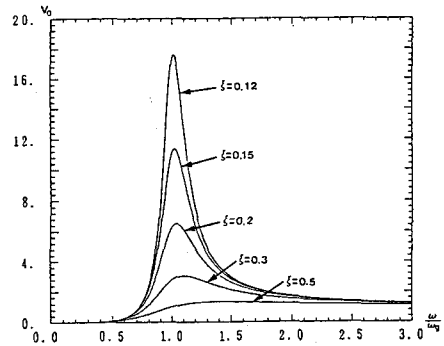


Fig.4 Power Spectrum Model Used in this Study

アクティブコントロールによる制御効率は、制御力が比較的小さい範囲内において、ノード13,7,6,8,5,12,9,4,10,11の順となっている。これらの順は次のように考えられる。ノード13は、2次モードをも含めた制御であっても最上端での制御は効率が良い。ノード7,6,8,5は2次モードの腹に当たる部分で振幅も大きく、従って同モードの制御効率が良い。ノード12は13の近傍である。ノード9,4は2次モードの腹であるが節に近い。ノード10,11は2次モードの節の部分である。

一方、ハイブリッドコントロールでは、制御位置による制御効率の順番はアクティブコントロールのそれとは同じである。しかし、制御力の増大による振動エネルギーの減少率が、制御力の比較的小さい範囲のみで良く、それ以降では極めて悪くなっていることに注意する必要がある。

他の数値計算例については、講演当日に発表する。

謝 辞

本文を取りまとめるに当たって協力を得た京都大学工学部修士課程学生馬場賢治君に感謝する次第である。

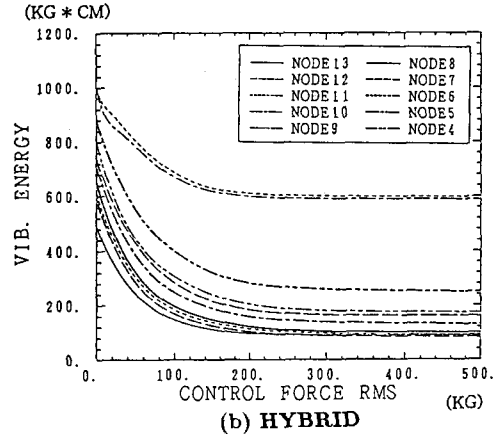
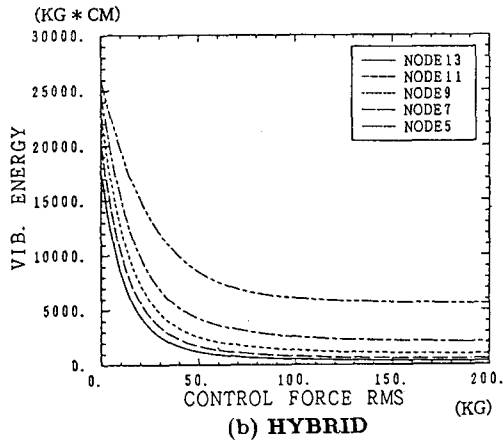
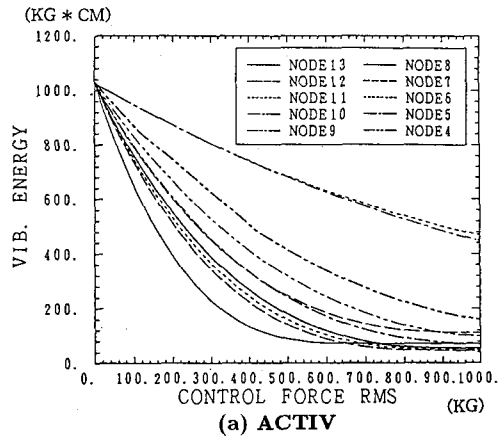
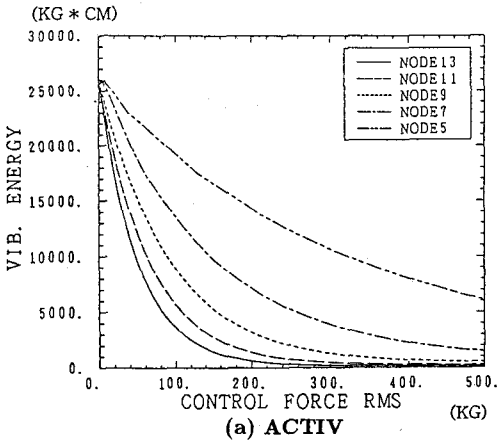


Fig.5 Trade-off Curve for Different Positions of Control Force
(Type A Input Ground Motion)

Fig.6 Trade-off Curve for Different Positions of Control Force
(Type B Input Ground Motion)