

作り出すことを制御という。この制御工学で使われる理論はさまざまである。以下において制御工学で一般的に用いられる最適制御理論から、能動的(アクティブ)制震に適用可能な瞬間最適化手法について述べる。

3.2 運動方程式と状態方程式

構造物の応答の記述は運動方程式を立てることから始まるが、その振動系をさらに一般的に記述する目的で、制御工学の分野では状態方程式が使われている。式(1)との対応として1自由度系構造物の運動方程式は次式で示される。

$$Mu''(t) + Cu'(t) + Ku(t) = f(t) \quad \dots\dots (2)$$

M, C, K 構造質量、減衰係数、剛性定数
 $f(t)$ 地震波による外力

式(2)に制御力の項を加えると次のようになる。

$$Mu''(t) + Cu'(t) + Ku(t) = f(t) + p(t) \quad \dots\dots (3)$$

式(3)から状態方程式を誘導する。まず、対象構造物の速度 u' 、変位 u を成分にもつ2次のベクトル、これを状態ベクトルという。

$$x(t) = \begin{Bmatrix} u' \\ u \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (4)$$

状態ベクトル $x(t)$ と運動方程式(3)から状態方程式(5)が導かれる。

$$x'(t) = Ax(t) + Bp(t) + Df(t) \quad \dots\dots (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} M^{-1} \cdot 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} M^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.3 瞬間最適化手法

最適制御理論では、算定した制御入力の実現性を判断するための判断基準として評価関数を設定するが、評価関数は、制御の継続時間全体で制御効果を評価するために積分記号を含み、一般には外乱が既知でなければ解けない2点境界値問題となる。しかし、将来構造物が遭遇する地震外乱を予測することは不可能である。そこで、構造物が受ける外乱が予測できないことを認識しながらも、観測可能な外乱情報を積極的に取り入れようとする制御が提案されるようになった。その代表的な制御である瞬間最適化手法を本研究では用いる。特徴的なのは、評価関数は制御の継続時間全体でなく、各微小時間で設定し次のように表すことができる。

$$J(t) = x^T(t) Q x(t) + p^T(t) R p(t) \quad \dots\dots (6)$$

$p(t)$ は制御力、 Q と R はそれぞれ2次の非負定値正方行列と正定値正方行列である。式(6)で表される評価関数において第1項が小さいということは $x(t)$ が小さい、つまり応答が小さいということをし、第2項が小さいということは、制御力が小さい、つまり制御に必要なエネルギーが小さいということである。第1項、第2項の要求は互いに反するものであり、応答を低減するのか、制御に必要なエネルギーを小さくするのか、どちらを重視するのかによって、定数行列 Q と R により大きな重みを課す。この Q と R を重み行列といい、この Q と R に適切な重みを課してバランスの取れた制御システムを作り出す。

式(5)と(6)からラグランジェの未定乗数法を用いて最適化することによりと制御力 $p(t)$ と状態ベクトル $x(t)$ が求まる。

$$p(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T Q x(t) \quad \dots\dots (7)$$

$$x(t) = \left[I + \frac{(\Delta t)^2}{4} B R^{-1} B^T Q \right]^{-1} \left[T(t-1) + \frac{\Delta t}{2} D f(t) \right] \quad \dots\dots (8)$$

ここで

$$T(t-1) = \exp(A \Delta t) \left[x(t-1) + \frac{\Delta t}{2} \left\{ B p(t-1) + D f(t-1) \right\} \right] \quad \dots\dots (9)$$

式(7)、(8)により各微小時間の制御力と応答値が求まる。

4. 最適制御手法の浮体構造への適用

解析モデルは図1で示されるものと同様である。式(1)から制御力 $p(t)$ を受ける場合の浮体構造の運動方程式は次式になる。

$$\left\{ M_R - (C_M - 1) \rho_1 \frac{\pi D^2}{4} \right\} u'' + C u' + \frac{4EA_s}{50L_s} u \cos^2 \theta = f_0(t) + p(t) \quad \dots\dots (10)$$

$$\text{ここで、} f_0(t) = C_M \rho_1 \frac{\pi D^2}{4} \cdot A_F + C \cdot V_F + \frac{4EA_s}{50L_s} \cos^2 \theta \cdot W_B \quad \dots\dots (11)$$

浮体構造の挙動を1自由度として瞬間最適化手法を適用することにより、式(7)、(8)から各微小時間において浮体構造の加えるべき制御力とそのときの応答値が求まる。

また式(6)、(7)、(8)での重み行列 Q 、 R は式(10)において u'' 、 u' 、 u の係数部分を M 、 C 、 K で置き換えることにより次式で与えられるものを採用した。

$$Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad R = \gamma I = \gamma \cdot 1 \quad \dots\dots (12)$$

ここでは重み行列の Q 、 R の相対的な大きさが制御効果に影響を及ぼすため、 Q を固定し R を単位行列 I の実数倍として変化させた。 γ がそのパラメーターである。本研究では制御力数が1のため R はスカラー量となる。このような重み行列 Q 、 R を採用したのは式(4)の状態ベクトルと式(6)の評価関数から浮体構造の応答変位、応答速度を制御しようとするものである。

5. 数値解析結果

図1に示したように、P波が鉛直上向きに入射してきた場合の浮体構造の鉛直応答量および制御力に関する数値解析を実施し、重み行列の大きさと制御効果の関係などについて検討を行った。

制御対象である浮体構造およびテンションレグの材料物性値・断面諸元を表1に示す。海底地盤については、北海道噴火湾の最深部を想定し、表層を沖積層、基礎をグリーンタフの2層とした。また入力地震波は耐用年数100年、再現期間950年という想定で算定された設計入力用上下方向地震波を用い、その最大加速度は海底面で75galとなる。

時刻歴応答解析ではフィードバック制御によって得られた式(8)および(7)から浮体構造の応答およびその時の制御力を求める。なお、式(9)における Δt の計算では、その8次の項まで採用した。離散時間間隔は $\Delta t = 0.01$ 秒である。

図2は重み行列 R (スカラー量)のパラメータ γ を $1.0 \times 10^{-2} \sim 10^{-8}$ まで変化させた場合の浮体構造の応答変位および制御力の最大値の変化を示

表1 数値解析に用いた材料物性値・断面諸元

浮体構造物		テンションレグ	
断面径	$D = 23.0 \text{ m}$	係留索形状	C'タイプ $\theta = 30^\circ$
設置水深	$d = 41.5 \text{ m}$	断面積	$A_s = 0.09 \text{ m}^2/\text{本}$
(重心位置まで)		弾性係数	$E = 2.1 \times 10^7 \text{ ton/m}^2$
水深	$h_1 = 100 \text{ m}$	長さ(設置後)	$L_s = 60.91 \text{ m}$
浮体構造重量	$M_F = 288 \text{ ton/m}$	初期張力	$T_0 = 2020 \text{ ton/本/50 m}$
慣性力係数	$C_M = 2.0$		
抗力係数	$C_D = 1.0$		
地盤諸条件		基礎(グリーンタフ)	
表層地盤(沖積層)		基礎	$H_b = 30 \text{ m}$
層厚		単位体積重量	$\rho_s \gamma = 2.2 \text{ ton/m}^3$
単位体積重量	$\rho_s \gamma = 1.8 \text{ ton/m}^3$	P波の伝播速度	$V_P = 2000 \text{ m/sec}$
P波の伝播速度	$V_P = 1500 \text{ m/sec}$		

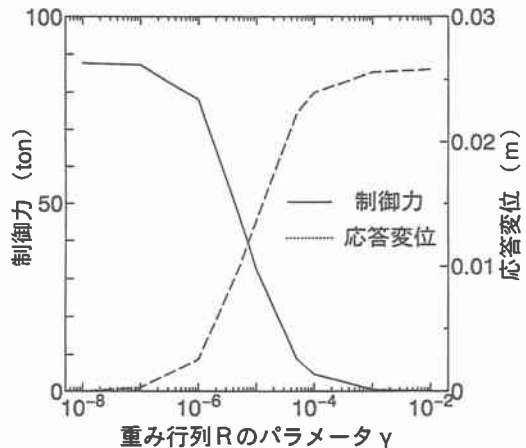


図2 パラメータ γ に対する最大応答値と制御力の関係

したものである。パラメータ γ を指数的に減少させるにしたがって応答変位は無制御状態での最大値0.0258 mから、その1%以下にまで低減し、一方最大制御力は約88tonまで増大して上限値となる。また、応答変位および制御力ともに、 $\gamma=1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-8}$ の範囲内で急激に変化することがわかる。さらに、浮体構造の応答速度に関しても、応答変位と全く同様な低減効果を示していた。次に、浮体構造の応答変位波形を無制御時と制御時とで比較した結果を図3(b)、(c)に示す。また、同図には(d)入力地震波(加速度波形)および(a)制御力の波形も示してある。これらは、パラメータ $\gamma=0.5 \times 10^{-5}$ の場合の結果である。両者の応答波形の比較から、全時間帯で十分な応答の低減が見られ、その最大値は約38%までに減少している。その時の制御力の最大値は、47.1tonで上限値の約54%程度である。

以上は時間領域での検討結果であるが、ここで振動数領域での制御効果について述べる。入力地震波の卓越振動数は1.2Hz、2.5Hz、0.8Hzに対して、無制御時の応答変位・速度は0.8Hz成分が卓越し、これは浮体構造の基本固有振動数と一致していた。これに対して、制御時の応答変位・速度は0.8Hz成分が押さえられ、特に卓越した振動数成分が見られなくなるという特徴的な制御効果を示した。

6. おわりに

最適制御理論における瞬間最適化手法を用いて、海震を受ける浮体構造の鉛直応答制御を試み、一応の成果を得たと考える。今後は、エネルギー的観点からの制御効果の考察、さらには制御入力に上限値が付けられた制御問題などの研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 水中トンネル研究調査会(構造研究分科会)：平成3年度 技術検討課題の検討結果報告書，1992.
- 2) 石原 研，木村 孟：土質力学(土木工学体系 8)，第3章 波動伝播理論，彰国社，pp.251~284，1980.
- 3) 大崎 順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1976.
- 4) 小堀 鐸二：制震構造，鹿島出版会，1993.
- 5) 武田 寿一：構造物の免震・防震・制震，技報堂出版，1988.
- 6) 小郷 寛，美多 勉：システム制御理論入門，実教出版，1992.
- 7) J. N. Yang, A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami: New optimal control algorithms for structural control, Journal of Engineer Mechanics, ASCE, Vol.113, No. 9, pp.1369-1386, 1987.
- 8) 野田 茂，嶋田 三朗，藤波 健剛，中野渡 悟，上代 悟史：非線形履歴構造物の制震の検討事例，構造工学論文集，Vol.37A，pp.825-837，1991.

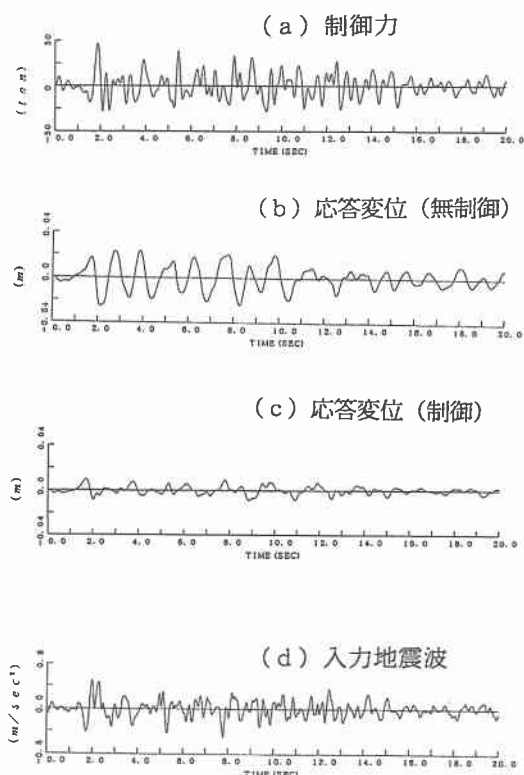


図3 浮体構造の応答変位波形の比較
および制御力波形($\gamma=0.5 \times 10^{-5}$)