

海震を受ける浮体構造の鉛直挙動と瞬間最適制御

北海道大学大学院 学生員 広島 隆司

北海道大学工学部 正会員 佐々木康彦

1. まえがき

水深が非常に大きい海峡部や湾口などを横断する「水中トンネル」と呼ばれる浮体式海洋構造物の建設に関して、近年様々なプロジェクトが提案されている。本研究では、この様な海底面に緊張係留される浮体構造が海震(seaquake)による上下地震動を受けた場合の鉛直挙動解析を試みた。さらに、状態ベクトルと制御力に関する二次形式を評価関数とする最適制御理論、特に未知の地震外乱にも対応可能な「瞬間最適化手法」を適用し、浮体構造の鉛直応答変位の低減効果について検討を行った。

2. 海震を受ける浮体構造の鉛直挙動解析

2.1 解析モデルと運動方程式 図1に示すように、テンションレグ(緊張係留索)を用いて海水中に支持された浮体構造の横断面内における鉛直挙動を考える。中空円断面の浮体構造本体を円形剛体とし、傾斜配置されたテンションレグはその鉛直方向剛性を線形バネにモデル化する。浮体構造に作用する流体力としては、修正モリソン式における慣性力項並びに粘性減衰力を考慮した。また、海震についてはP波が海底地盤に対して鉛直上向きに入射するとした。

この様な浮体構造の鉛直変位 $u(t)$ を未知量とする1自由度系の運動方程式は次式となる。

$$(M_R - \rho_1 \pi D^2 / 4) u'' + C_H \rho_1 \pi D^2 / 4 \cdot (u'' - A_F) + C(u' - V_F) + 4E_s A_s \cos^2 \theta / 50 L_s \cdot (u - W_b) = 0 \quad (1)$$

ここで、 $()'$ は時間微分を表す。この運動方程式によると、海底面での鉛直変位 W_b によってテンションレグを伝達する動的外力だけでなく、浮体構造位置での水粒子の加速度 A_F 、速度 V_F を考慮しているので海水中を伝播する圧力波の影響も検討が可能である。

2.2 数値解析結果 ここで用いた浮体構造およびテンションレグの断面諸元・材料物性値の一覧を表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ている。また、図2(c)に示す入力地震波は同地点で算定された設計入力用上下方向地震波形であり、海底面において最大加速度が0.077 g (75gal)になる。

図2(a)に浮体構造の鉛直応答加速度を示す。その最大値0.16 gの海底面に対する応答倍率は2.1倍となり、この浮体構造の固有振動数である0.8Hz成分が卓越していた。また、浮体構造と海底面との相対変位から求めたテンションレグの変動張力を同図(b)に示す。引張側と圧縮側の最大値はそれぞれ501ton/-410tonであり、初期張力2020tonと比べると“スラック(弛緩状態)”は発生しない応答レベルであることが判明した。

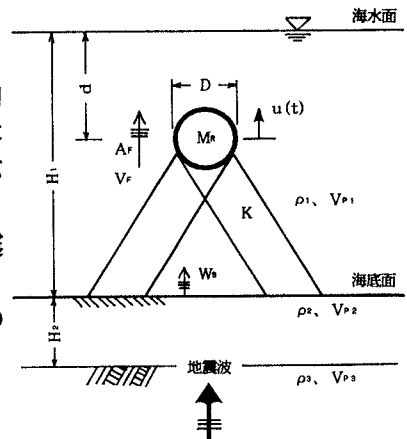


図1 緊張係留された浮体構造の解析モデル

表1 断面諸元と材料物性値

《浮体構造》		《テンションレグ》	
断面外径	$D = 23.0 \text{ m}$	係留索長さ	$L_s = 60.9 \text{ m}$
浮体構造重量	$M_R g = 288 \text{ ton/m}$	断面積	$A_s = 0.09 \text{ m}^2 / \text{本}$
設置水深	$d = 41.5 \text{ m}$	設置傾斜角	$\theta = 30^\circ$
水深	$H_1 = 100 \text{ m}$	弾性係数	$E_s = 2.1 \times 10^7 \text{ ton/m}^2$
		初期張力	$T_s = 2020 \text{ ton/本}$
《海底地盤》			
II. 表層地盤(沖積層)		III. 基盤(グリーンタフ)	
厚	$H_2 = 30 \text{ m}$	$H_3 = \infty \text{ m}$	
単位体積重量	$\rho_2 g = 1.8 \text{ ton/m}^3$	$\rho_3 g = 2.2 \text{ ton/m}^3$	
P波伝播速度	$V_{p2} = 1500 \text{ m/sec}$	$V_{p3} = 2000 \text{ m/sec}$	

3. 最適制御理論の浮体構造への適用

3.1 瞬間最適化手法 本研究では、海震を受ける浮体構造の鉛直挙動に対して、運動方程式(1)の右辺に適切な制御力 $p(t)$ を付加して積極的に応答を低減させる「制御力型の能動的(アクティブ)制震」を試みた。

最適制御理論では、算定した制御力の最適性を判断するために評価関数を設定して制御目的を明確化する。しかしながら、現状では地震外乱を事前に予測し、継続時間全体で制御効果を評価することは不可能である。そこで、観測可能な外乱情報を時々刻々と取り入れながら、各時刻で評価関数を設定し最適化を行う「瞬間最適化手法」が提案された²⁾。この手法における評価関数 $J(t)$ は次式の様に表される。

$$J(t) = \mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{p}(t)^T \mathbf{R} \mathbf{p}(t) \quad (2)$$

ここで、状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ の成分は鉛直速度 $\mathbf{u}'(t)$ および変位 $\mathbf{u}(t)$ である。また、重み行列 $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ によって応答低減と制御システム規模のバランスを考慮する。制御則の誘導については、ラグランジュの未定乗数法を用いて評価関数と状態方程式から構成されるラグランジュ関数を最小化し、各時刻での最適な制御力 $\mathbf{p}(t)$ および状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ を求める。

3.2 数値解析結果 重み行列 $\mathbf{R}$ をパラメータ(1自由度系ではスカラー量 γ)にして指数的に変化させた場合の、浮体構造の鉛直応答変位および制御力の最大値の変動状況を図3に示す。パラメータの減少に伴って応答変位は、無制御時での最大値2.58cmからその1%以下にまで低減する。他方、制御力は約88tonまで増大して一つの限界値を取ることがわかる。

次に、無制御時と制御時($\gamma=0.5 \times 10^{-5}$)との鉛直応答変位波形を比較して図4(a)、(b)に、また付加した制御力波形を同図(c)に示す。これらの結果から、応答変位の最大値が約38%までに減少するだけでなく、全時間帯で良好な低減効果が得られることが判明した。なお、制御力の最大値は47.1tonで、前述した限界値の約54%であった。

参考文献

- 1) Morita, S. et al.: Response of submerged floating tunnels to vertically impinging seismic waves, Proc. of the Third Symposium on Strait Crossings, 1(1994), 675-681.
- 2) Yang, J. N., A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami: New optimal control algorithms for structural control, J. Engrg. Mech., ASCE, 113(1987), 1369-1386.

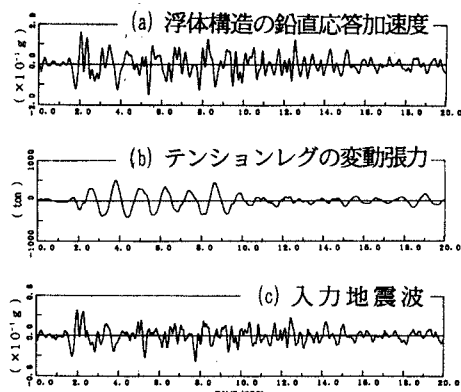


図2 入力地震波および浮体構造の鉛直挙動(無制御)

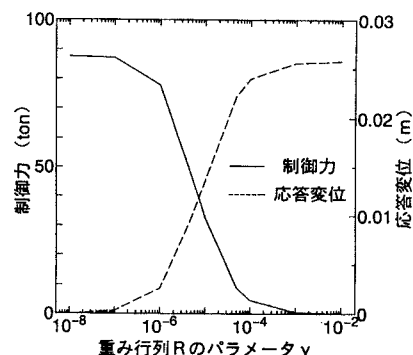


図3 パラメータ γ に応じた応答変位と制御力の最大値

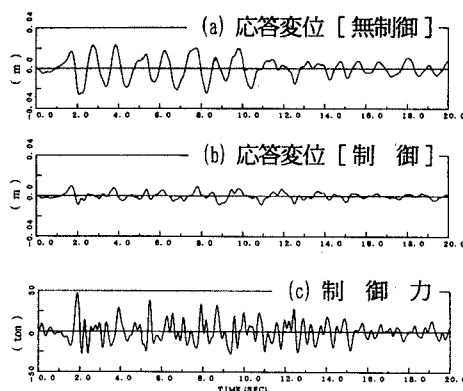


図4 浮体構造の鉛直応答変位波形の比較と制御力波形