

I-B 323

浮体・係留系の地震時安定性について

川崎製鉄 正会員 ○平本高志
同上 正会員 森 浩章
同上 正会員 小池 武

1. はじめに

超大型浮体構造物¹⁾の実現を目指した研究開発が、マフロード技術研究組合を中心に行なわれている。本研究は、当該研究組合の浮体設計技術に関する研究の一環であり、地震荷重に対する浮体・係留系の相互作用および耐震安全性照査の検討を目的として、浮体・係留系の地震時挙動解析を実施した結果を報告するものである。

対象とする浮体は、海上空港などの大規模な浮体構造物を想定しており、その一辺は最大約5km、高さ約5m前後の矩形板形状である。浮体は、自然条件としての風荷重、波浪荷重、温度荷重および地震荷重（津波、海震、構造物応答を含む）、さらに人間活動としての航空機離発着の衝撃荷重や船舶・航空機の衝突荷重に対して、安全かつ全体変位挙動が安定的であるように、その周辺に並んだ係留施設により拘束される。

浮体と係留施設を連結する緩衝装置が一般的に粘弾塑性の性質を示す部材で製作されるため、浮体挙動は浮体と多数の係留施設から構成される浮体・係留系の非線形応答解析により評価することができる。

超長期の耐用期間における超大型浮体構造物の耐震安全性を論議するためには、少なくとも以下の項目に関する検討が必要になる。

- (1) 耐用期間T年間に発生する最大地震規模予測と周辺地域で発生する地震動波形の推定
- (2) 係留施設・基礎・地盤系の地震応答解析
- (3) 位相差を伴う入力地震波に対する浮体・係留系の地震応答解析
- (4) 浮体の最大応答予測
- (5) 係留施設の設置誤差、地震発生時の浮体・係留系相対位置のランダム性、係留施設終局耐力の推定誤差などが浮体の地震時安定性に及ぼす影響評価

以上の検討項目の内、本論文では項目（3）について、その検討結果を報告する。なお、議論の複雑さを避けるため、浮体は剛体挙動し、緩衝装置を含む浮体・係留系全体は線形挙動をするものと仮定する。

2. 解析方法

係留施設は、図1に示すように浮体に平行に一直線に配置され、その天端は緩衝装置をもって浮体に連結されている。浮体に関する運動方程式は、図2に示す作用力 G_j, F_i および作用モーメントの合力が浮体の慣性力および粘性抵抗力と釣り合うことから次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M\ddot{u} + C\dot{u} &= \sum_j G_j \\ M\ddot{v} + C\dot{v} &= \sum_i F_i \\ I\ddot{\theta} + C_\theta\dot{\theta} &= \sum_i F_i(x_i - x_f) - \sum_j G_j(y_j - y_f) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 M, I, C, C_θ は、それぞれ浮体の質量、慣性2次モーメント、水平運動に関する粘性係数、回転運動に関する粘性係数である。さらに、 u, v, θ は浮体重心の水平移動量および回転角である。また、 x_f, y_f は重心位置の座標である。一方、 x_i, y_i は、係留施設天端の応答変位を表す。

地震波は、地盤物性が均一な地盤では等速度 V_s で伝播し、地盤物性が空間的に不規則に変化したり、地形が局所的に変動している場合は、伝播速度の空間的コヒーレンスを反映した速度で伝播する。この時、各係留施設の支持基盤に到達

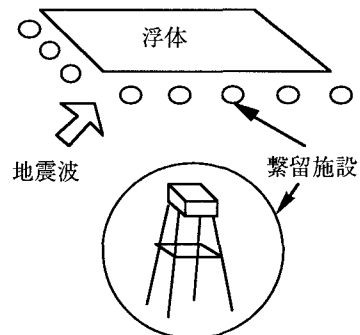


図1 浮体・係留系

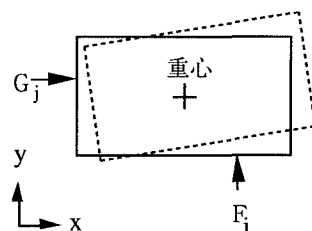


図2 浮体に作用する地震時外力の配置

する地震波のパワースペクトル密度は、次式で表現することができる。

$$S(s, \omega) = S(0, \omega) \exp\left(-\frac{i\omega s}{V_s}\right) \text{coh}(s, \omega) \quad (2)$$

ここで、 $S(s, \omega)$ は相対距離 s 、周波数 ω におけるパワースペクトル密度であり、 $\text{coh}(s, \omega)$ は、たとえば次式²⁾で与えられる。

$$\text{coh}(s, \omega) = \exp\left(-\frac{\alpha \omega |s|}{2\pi V_s}\right) \quad (3)$$

ただし、 α はパラメーター。

3. 検討結果

入力地震波は、海洋型地震と直下型地震を想定して1978年宮城県沖地震と1995兵庫県南部地震の記録を使用した。想定設置地盤の地盤条件を表1に示す。

浮体は、長辺5km、短辺1km、高さ10mの長方形躯体であり、ドルフィン50m間隔で長辺、短辺それぞれ片側一列に配列した。想定した緩衝装置は比較的剛性の高いものであり、浮体の固有周期は約8秒となった。浮体の減衰は浮体底面の摩擦抵抗および前面の圧力抵抗より算定した。

図3は、緩衝装置に発生する反力の時刻歴応答であり、地震入力作用後も浮体の固有周期に従って自由振動している様子がわかる。

図4は、浮体重心の水平面内の平行運動および回転運動の時刻歴応答を示したものである。同図は、地震波が浮体に対して45度方向から伝播速度無限大（位相差ゼロ）で入射した場合の結果を示している。

同図によると、浮体の水平運動は短辺方向の振動が長辺方向よりも大きく、回転運動の振動特性は浮体の固有周期で振動しているものの、その振幅は $5 \times 10^{-6} \text{radian/sec}^2$ と非常に小さな応答を示している。水平運動についても、その最大応答加速度はy方向で2gal程度であり、入力地震加速度(314gal)の約0.6%の値であった。

4. 結論

位相差入力を受ける浮体・係留系の地震時応答解析を実施した。等伝播速度の場合、浮体の応答は、位相差ゼロの場合が、非ゼロの場合に比べて相対的に大きい応答を示した。しかし、緩衝装置の変位吸収性能により、地盤の揺れに対して浮体の揺れが相当に小さいという浮体の耐震（免震）機能を確認することができた。今後は、冒頭に述べた残された課題を逐次検討する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本造船学会：超大型浮体構造物、海洋工学委員会性能部会編、成山堂書店、1995。
- 2) 日野幹雄：スペクトル解析、浅倉書店、1977。

表1. 地盤条件

土層	層厚 H(m)	γ' (t/m ³)	一軸圧縮強度 qu(kgf/cm ²)	せん断強度 Ccu(tf/m ²)	N 値	kh (kgf/cm ³)
①	18.5	0.65	0.04Z(Z=0, at 6. L)	0.27(Z=0, at 6. L)	—	0
②	10.5	0.75	— (N=20)	—	30	4.5
③	13.5	0.80	—	—	10 (H=12m)	1.5
④	14.0	0.60	0.7 $\Sigma \gamma' H$	0.4 $\Sigma \gamma' H$	20 (H=45m)	3.0
⑤	40.5	0.75	(H: 地盤層厚)	(H: 地盤層厚)	50 (H=91m)	7.5
⑥	25.0	0.65	—	—	—	—
⑦	55.0	0.70	—	—	—	—

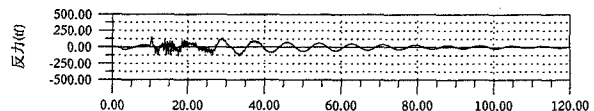


図3. 緩衝装置の応答

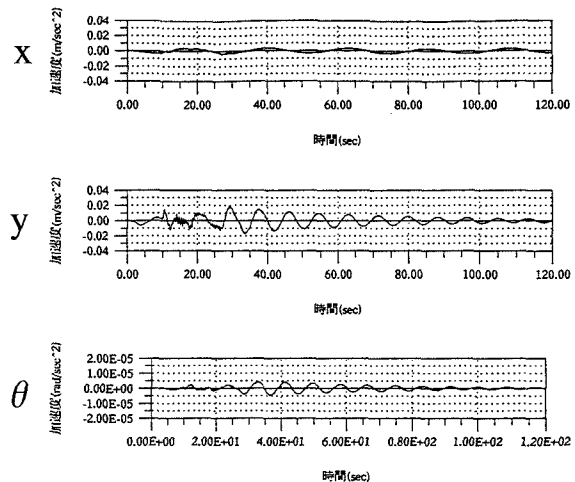


図4. 浮体の応答