

超大型浮体式構造物の地震時挙動解析

小池 武¹・平本高志²

¹正会員 工博 川崎製鉄株式会社 鋼構造研究所 (〒263 千葉県稲毛区長沼町351)

²正会員 工修 川崎製鉄株式会社 橋梁・鉄構事業部 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-3)

本研究は、メガフロート研究組合の浮体設計技術に関する研究成果の一部である超大型浮体式構造物の地震時挙動解析結果について述べたものである。

本報告では、浮体、緩衝装置、係留施設、地盤からなる多自由度振動系を解析対象として、地震波の種類・伝播速度・方向、緩衝装置の反力特性、係留施設の振動特性に対する耐震安全性検討を行なった。

解析結果によれば、固有周期が非常に長い超大型浮体式構造物は、既往大地震に対する地震応答量が小さく、耐震的に安全であることが判明した。

KeyWords: floating structure, earthquake, response analysis, dolphin, progressive failure

1. はじめに

超大型浮体式構造物は、広大な海面を利用できることから空港や発電施設など巨大重要構造物としての用途が注目されている。しかし、その建設に多額の投資と社会的合意が必要なことから、その構造物は少なくとも100年単位の耐用期間における自然災害および偶発事故からの安全性を確保できるものでなくてはならない。

本研究では、海洋構造物に作用する外荷重の一つである地震（海震を除く）に対する超大型浮体式構造物の耐震安全性を検討する。

浮体式構造物(浮体)を安定的に係留するために、小規模の浮体では一般的にケーブル式係留が採用されるが、超大型浮体の場合には構造物変位応答を制限範囲内に留めるため比較的剛性の高いドルフィン式の係留方式が採用される。曲げ剛性を無視できるケーブル方式の場合には、地震動は浮体に伝達されることがなく免震的であるが、ドルフィン方式ではドルフィン天端の慣性力が浮体-ドルフィン間の緩衝装置を通じて浮体に作用するため、浮体全体として地震応答を示すことになる。

浮体の固有周期は、ドルフィンおよび浮体・ドルフィン間の緩衝装置の総合的なばね特性に依存するため、通常の土木構造物に比較してより長周期的特徴を示すと予想される。したがって、地震応答評価に当たっては、長周期成分が卓越する地震動入力の選択に配慮する必要がある。

また、浮体重心回りの地震応答が過大になると、浮体寸法が大きくなだけに、浮体が回転運動を始めると浮体先端部に接続する一部ドルフィンが破壊して係留能力が低下する場合は懸念される。このような逐次破壊が進展する可能性についても数値的検討を行なった。

2. 解析方法

(1) 解析モデル

対象とする浮体は、図-1に示すように多数のドルフィンにより固定される。これは、従来のケーブル係留式浮体に比較すると、より一層浮体本体の変位挙動を制限しようとする構造形式となっている。ドルフィンとは、図-2に示すように杭支持された骨組

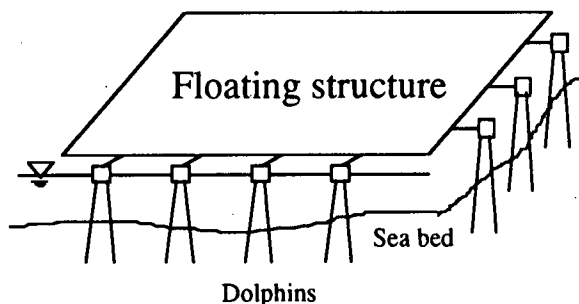


図-1 浮体-ドルフィンシステム

構造物であり、浮体とドルフィン天端とをバネとダッシュポットでモデル化される係留装置により連結されている。ここでは個々のドルフィンを1自由度振動系としてモデル化すると、地震入力に対するドルフィン天端の伝達関数は、式-1で与えることができる。

$$H_j(\omega) = \frac{1 + 2ih_{2j}\omega_{2j}/\omega - (\omega_{2j}/\omega)^2}{H_1(\omega)} \quad (1)$$

$$H_1(\omega) = (\omega_{1j}^2 + \omega_{2j}^2 - \omega^2) + 2i(h_{1j}\omega_{1j} + h_{2j}\omega_{2j})\omega \quad (2)$$

ここで、 ω_{1j} 、 ω_{2j} はそれぞれ第jドルフィンとその係留装置の固有振動数である。

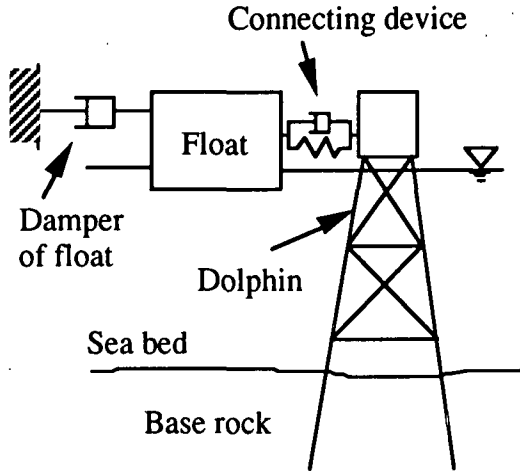


図-2 ドルフィンの構造モデル

$$\omega_{2j} = \sqrt{\frac{k_j}{m_j}} \quad h_{2j} = \frac{c_j}{2\sqrt{m_j k_j}} \quad (3)$$

ここで、 m_j, c_j, k_j はそれぞれドルフィン天端質量そして緩衝装置の減衰定数、ばね定数である。

浮体は、水平面内でのみ運動し、ドルフィンからの作用荷重に対して弾性変形をしないと仮定する。したがって、浮体を剛体としてモデル化する。浮体の地震応答に対して、浮体底面および側面は海水との摩擦力により応答に減衰効果を及ぼすため、それを評価する減衰係数を考慮する必要がある。

図-3は浮体とドルフィンの配置を示している。地震によるドルフィン天端の応答は、浮体に式-4で示す慣性力 F_i, G_j を作用させることになる。

$$F_i = k_i^* \left\{ \dot{v}_i - (x_i - x_f) \dot{\theta} - v \right\} + c_i \left\{ \dot{v}_i - (x_i - x_f) \dot{\theta} - \dot{v} \right\}$$

$$G_j = k_j^* \left\{ u_j + (y_j - y_f) \dot{\theta} - u \right\} + c_j \left\{ \dot{u}_j + (y_j - y_f) \dot{\theta} - \dot{u} \right\} \quad (4)$$

ここで、 u, v, θ は浮体重心 (x_f, y_f) の水平面内の応答値である。ただし、ばね定数 k_j^* はドルフィン剛性と緩衝装置のばね特性を式-5によって総合評価した特性値である。

$$k_i^* = m_i \omega_{ni}^2 \quad \omega_{ni} = \frac{\omega_{1i} \omega_{2i}}{\sqrt{\omega_{1i}^2 + \omega_{2i}^2}} \quad (5)$$

(2) 運動方程式

浮体重心に関する運動方程式は式-6で与えられる。

ここで、 M, I, C, C_θ はそれぞれ浮体質量、慣性モーメント、水平・回転運動に対する減衰係数である。同式は応答値ベクトル $Q = \{u, v, \theta\}$ およびその一般化座標ベクトル q と固有値マトリクス $[\phi]$ を用いることで

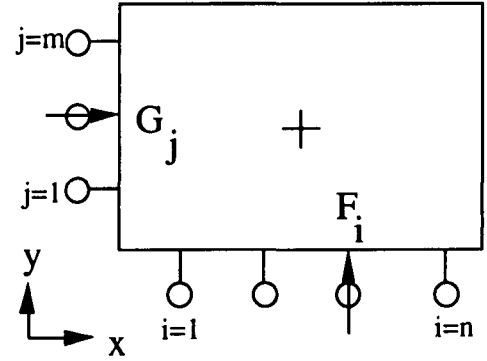


図-3 浮体ドルフィン配置

式-7の振動方程式¹⁾を得る。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} = \sum_j G_j$$

$$M \ddot{v} + C \dot{v} = \sum_i F_i \quad (6)$$

$$I \ddot{\theta} + C_\theta \dot{\theta} = \sum_i F_i (x_i - x_f) - \sum_j G_j (y_j - y_f)$$

$$\{\ddot{q}\} + [2h_n \omega_n] \{\dot{q}\} + [\omega_n^2] \{q\} = [\phi]^T \{W(t)\} \quad (7)$$

ただし、

$$\{Q(t)\} = [\phi] \{q(t)\} \quad \vartheta = L \theta \quad L = \sqrt{\frac{I}{M}}$$

したがって、右辺 $\{W(t)\}$ は以下の式-8から式-10で表現できる。

$$\{W(t)\} = \begin{Bmatrix} W_x(t) \\ W_y(t) \\ W_\theta(t) \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sum_k a(\omega_k, t) \left\{ \sum_j K_y(\omega_k, y_j, \psi) \right\} \\ \sum_k a(\omega_k, t) \left\{ \sum_i K_x(\omega_k, x_i, \psi) \right\} \\ \sum_k \frac{a(\omega_k, t)}{L} \left\{ \sum_i K_x(\omega_k, x_i, \psi) (x_i - x_f) - \sum_j K_y(\omega_k, y_j, \psi) (y_j - y_f) \right\} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、非定常パワースペクトル密度 $S_0(\omega, t)$ を用いて入力地震動成分を次式で表現する。

$$a(\omega_k, t) = \sqrt{2S_0(\omega_k, t) \Delta\omega} \exp\{i(\omega_k t + \phi_k)\} \quad (9)$$

そして、

$$K_x(\omega_k, x_i, \psi) = \frac{m_i}{M} b_x(\omega_k, x_i, \psi) (2ih_i\omega_{n_i} + \omega_{n_i}^2) H_i(\omega_k)$$

$$K_y(\omega_k, y_j, \psi) = \frac{m_j}{M} b_y(\omega_k, y_j, \psi) (2ih_j\omega_{n_j} + \omega_{n_j}^2) H_j(\omega_k)$$

$$b_x(\omega_k, x_i, \psi) = \cos\psi \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\omega_k}{2\pi} \frac{\alpha|x_i - x_f|}{c_s} - i\omega_k \frac{x_i - x_f}{c_s} \right]$$

$$b_y(\omega_k, y_j, \psi) = -\sin\psi \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\omega_k}{2\pi} \frac{\alpha|y_j - y_f|}{c_s} - i\omega_k \frac{y_j - y_f}{c_s} \right]$$

(10)

ここで、 c_s, α, ψ はそれぞれ地震波伝播速度、空間変動パラメータ²⁾そして地震波の入射角度。

3. 解析事例

解析対象として、関西国際空港規模の構造物を想定し長さ5000m、幅1000m、高さ10mとした。ドルフィン¹⁾は50m間隔で長辺方向に116基、短辺方向に17基設置した。その他のパラメータは以下の通り。

項 目	単 位	数 値
ドルフィン固有周期	sec	0.5
ドルフィン減衰定数 h_{1j}	%	5
ドルフィン質量 m_j	ton	741
地震波伝播速度 c_s	m/sec	3000
入射角 ψ	度	45
緩衝装置バネ係数 k_j	tonf/m	10000
緩衝装置定数 h_{2j}	%	10
浮体減衰係数 C	%	2
空間パラメータ α		1

図-4は、解析に使用した入力地震波であり、図-5はその応答スペクトルである。それぞれの地震波はタイプI、タイプII（プレート境界型、直下型）を想定している。

図-6は、横軸に緩衝装置のばね定数を取り、縦軸に浮体ドルフィン系の固有周期を表示したものである。同図によると、剛性が小さな浮体系ではその固有周期（1次モード）は100秒以上になるが、逆に剛性が大きくなると20秒程度になる。とくに、浮体の回転挙動に関係している3次モードの固有周期は6秒から40秒の範囲で推移している。したがって、既存の一般的な地震動卓越周期と浮体系の固有周期が相当程度ずれており、超大型浮体は共振しにくい構造系であることがわかる。

図-7は本研究で使用した3地震波に対する浮体端部の最大応答変位であり、図-8は地震波伝播速度が浮体変位応答に及ぼす影響を見たものである。両図より最大変位応答値が1cm程度であり、浮体系の地

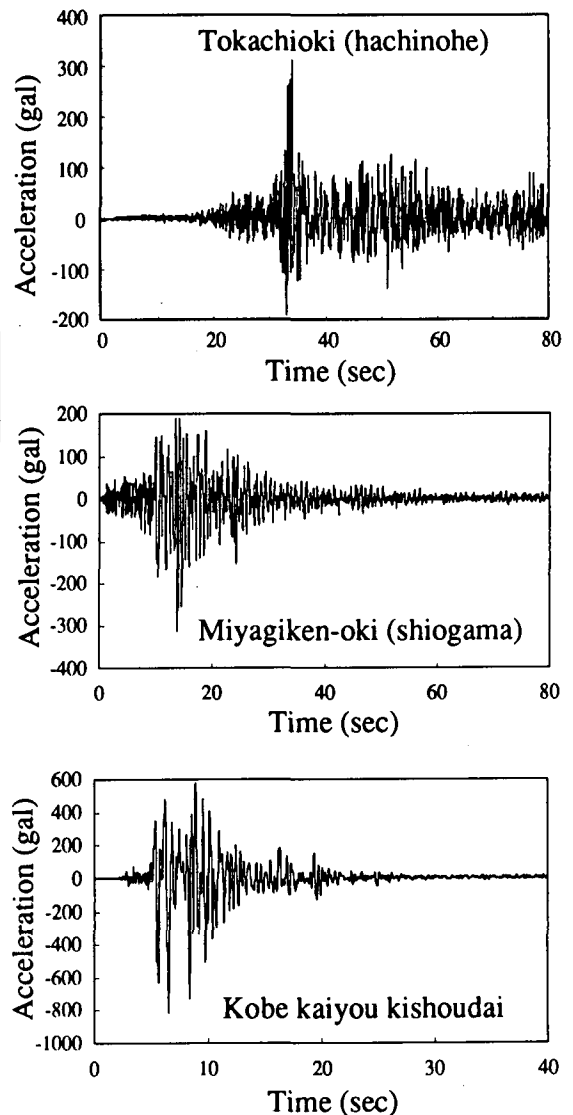


図-4 入力地震波の加速度時刻歴

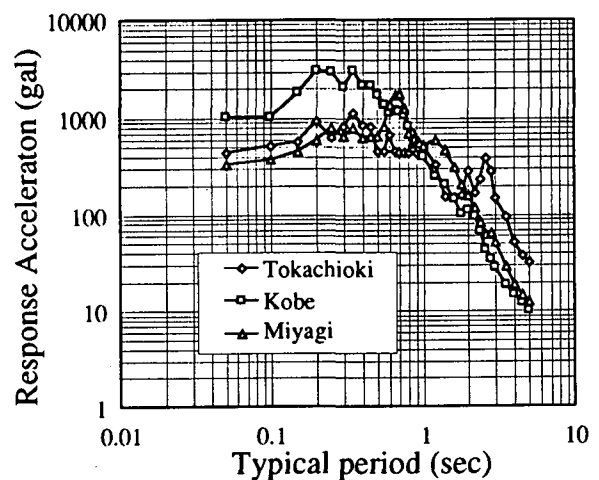


図-5 地震波の加速度応答スペクトル

震応答が非常に小さいことがわかる。また、地震波の伝播速度が遅いと入力位相差の影響が現れて、浮体系の最大変位応答値が増加する傾向が伺える。

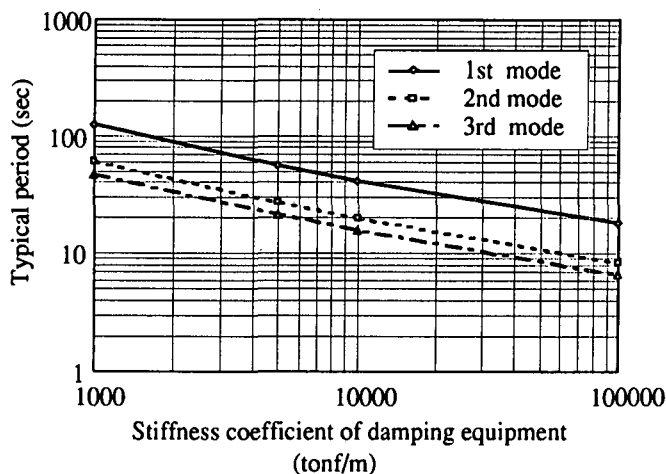


図-6 緩衝装置のばね定数に対する浮体固有周期

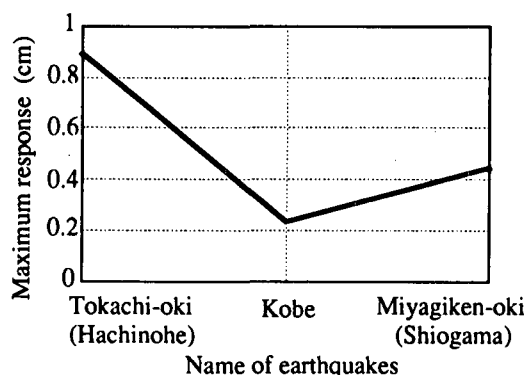


図-7 入力地震波に対する浮体端部の最大変位応答

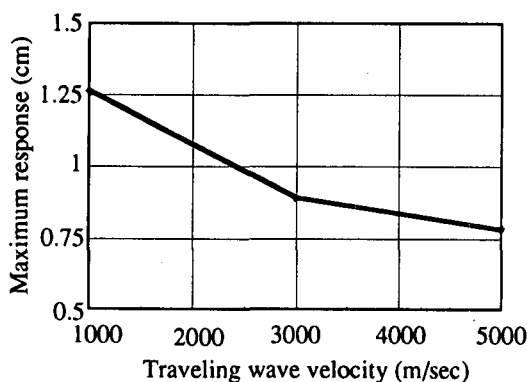


図-8 地震波伝播速度に対する浮体端部の最大変位応答

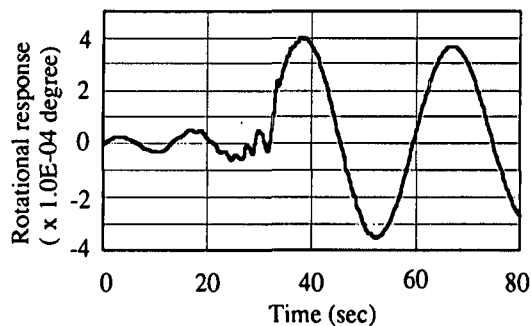


図-9 ドルフィンの逐次破壊条件下での浮体回転挙動

浮体端部の変位が大きくなり、浮体・ドルフィン間の許容変位を超過するとドルフィンが破壊する懸念がある。このような事態が発生した場合に、浮体系の固有周期、最大応答値がどう変化するかを検討した。ただし、解析を簡単化するため、ドルフィンの非線形応答は考慮せず、弾性応答値が基準値を超過すれば直ちに破壊すると仮定した。図-9は、浮体重心の回転応答を示したものである。32秒前後から応答値が大きくなるのは、その時点からドルフィンの一部が破壊を開始したことを示している。解析結果によると、当初浮体系の固有周期が41.3, 19.7, 15.5 (秒)であったのが逐次破壊の進展により115.5, 41.3, 29.6 (秒)に変化した。応答値は、破壊進展前に比較して約4倍程度に増加しているのがわかる。

4. まとめ

ドルフィンに支持された超大型浮体式構造物の地震時挙動を解析した。剛体と仮定した浮体と1自由度質点系にモデル化した133基からなるドルフィン集合体との連成振動系を解析対象として、浮体ドルフィン系の振動特性、地震応答特性を検討した。さらに、ドルフィンが逐次破壊する場合の浮体系の振動特性についても若干の数値的検討を行なった。

参考文献

- 1) Warburton, G.B.: The dynamical behavior of structures, Pergamon Press, 1976.
- 2) 日野幹雄: スペクトル解析、朝倉書店、1977、pp.238-242.

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF VERY LARGE FLOATING STRUCTURES

Takeshi KOIKE and Takashi HIRAMOTO

Seismic response analysis of a very large floating structure supported with many dolphins carried out to study the mutual interaction and its instability of the floating-dolphin system in the seismic environment. Several formulations are developed in the frequency domain with the power spectral density of the earthquake motions. Discussion is also devoted for the risk of the progressive failure which might be triggered by increasing damaged dolphins.