

海震時における超大型浮体式構造物の応答推定法に関する研究

増 田 光 一*・清水 建 一 朗**

1. 緒 言

海洋空間の有効利用を目的とした超大型浮体式構造物の実現のために、現在多くの研究が行われている。しかしながら、地震発生時の超大型浮体に働く海震荷重の影響に関する系統的な研究は少なく(清川, 1996; 肥後ら, 1997; Kobayashi ら, 1992), その構造物に対する影響については、明確になっていないのが現状であり、超大型浮体の実現のためにこの海震の影響を明確にしておくことは、必要不可欠な研究課題であると考えられる。

そこで、本研究では超大型浮体に働く海震荷重及びその弾性応答の数値解析法を開発し、本数値解析法を基にして、実施設計に於いて極めて重要である海震荷重に対する耐震設計の基礎データの取得することを目的とする。前報(増田ら, 1997)では境界積分方程式及びその高周波近似式を用い海震荷重を算定したが、本報ではその境界積分方程式の妥当性を水槽実験を行うことにより確認し、この境界積分方程式によって得られた海震荷重を外力とした超大型浮体の弾性応答を算定する。さらにその周波数領域の計算結果を時間領域に変換することにより、より具体的に超大型浮体への海震の影響を明らかにする。

2. 理論計算

本研究では、海震現象を2次元の数学モデルとして考える。まず周波数領域において、海震荷重を求めると共に、それを外力とした超大型浮体の弾性応答をモード解析法を用いて解析し、海震による超大型浮体への影響の基本特性を把握する。さらに時間領域解析でその影響をより具体的に捉える。また実験を行うことにより、本数値解析法の妥当性を確認すると共に、その周波数特性を明らかにする。

2.1 基礎方程式と核関数

流体は非粘性でかつその運動は非回転であるとするが、圧縮性を考慮する。座標系は図-1のように定義する。但し、 S_F は自由表面、 S_B は水底(ここでは剛体と仮

定する)、 S_H は浮体表面を表す。静水中には幅 B の浮体が存在しているとするが、本研究では超大型浮体を想定しているため、浮体の吃水は浮体の幅に比べて小さいとし、浅吃水の仮定が成り立つものとする。

また実際には海底の振動によって流体自身が運動し特に水深が浅い場合には自由表面の変動を伴うと考えられるが、ここでは地震動により発生する疎密波(音波)の周波数は高周波であると考え、流体内をその音波のみが伝播し、自由表面は変動しないものとする。

流体運動は速度ポテンシャルによって表されるとし、海底の地盤振動による疎密波の速度ポテンシャルを

$$\phi_I(x, y, t) = \text{Re}[\phi_I(x, y, \omega) \cdot e^{i\omega t}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

浮体による疎密波の散乱によって発生する散乱波ポテンシャルを

$$\phi_D(x, y, t) = \text{Re}[\phi_D(x, y, \omega) \cdot e^{i\omega t}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

浮体が運動することにより発生する発散波ポテンシャルを

$$\phi_R(x, y, t) = \text{Re}[\phi_R(x, y, \omega) \cdot e^{i\omega t}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

と定義する。各速度ポテンシャルは Helmholtz 方程式を支配方程式とし、各境界上で以下の境界条件を満足しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi + K^2 \phi &= 0 && \text{in } \Omega \\ \phi_I &= 0, \phi_D = 0, \phi_R = 0 && \text{on } S_F \\ \frac{\partial \phi_I}{\partial n} + \frac{\partial \phi_D}{\partial n} &= 0, \frac{\partial \phi_R}{\partial n} = \nu_R && \text{on } S_H \\ \frac{\partial \phi_I}{\partial n} &= \nu_I, \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = 0, \frac{\partial \phi_R}{\partial n} = 0 && \text{on } S_B \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Radiation Coordinate

ここで、 $K=(\omega/C)$ は波数、 C は水中音速である。また、 n は境界上に立てた流体に向かう単位法線を表す。 ν_I は地盤の鉛直方向の振動速度、 ν_R は浮体の鉛直方向の振動速度であり、地盤の振動振幅を a 、浮体の振動振幅を z として次のように表す。

$$\nu_I = i\omega a, \nu_R = i\omega z \quad \dots\dots\dots (5)$$

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科
** 工修 (株)日本港湾コンサルタント

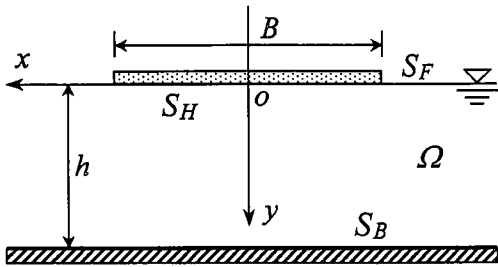


図-1 座標系

(4)式の境界条件において、浮体表面の境界条件以外の条件を満足する解である核関数は次のようになる。

$$S(x', y'; x, y) = -\frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left\{\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi y}{h}\right\} \times \sin\left\{\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\pi y'}{h}\right\} \frac{e^{-q_n \frac{\pi |x|}{h}}}{q_n} \dots (6)$$

$$\zeta = x - x' \dots (7)$$

$$q_n = \begin{cases} \sqrt{\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2} & \text{for } \left(n + \frac{1}{2}\right) > \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 \\ i\sqrt{\left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 - \left(n + \frac{1}{2}\right)^2} & \text{for } \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 > \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \end{cases} \dots (8)$$

のように与えられる。ここで $H_0^{(2)}$ は 0 次の第 2 種 Hankel 関数である。

2.2 境界積分方程式による海震荷重の算定

浮体の吃水は充分浅いので、その速度ポテンシャルは水面の圧力分布で表現できるとすると、散乱波問題に関しては

$$\phi_D(x', y') = -\frac{i}{\rho\omega} \int_{-B/2}^{B/2} p_D(x, 0) \frac{\partial}{\partial y} S(x', y'; x, 0) dx \dots (9)$$

$$p_D(x, 0) = -i\rho\omega\phi_D(x, 0) \dots (10)$$

と表すことができる。但し ρ は流体の密度であり、

$$p_D(x, 0) = -p_I(x, 0) + p_D(x, 0) \dots (11)$$

である。また海震によって振動する海底地盤の幅は、浮体の幅に比べ非常に大きなものであると考えられるので、無限大の幅で振動しているものとして、入射波に関しては、海底地盤の速度を用いて

$$\phi_I(x', y') = -\int_{-\infty}^{\infty} v_I(x, h) S(x', y'; x, h) dx \dots (12)$$

と表せ、浮体表面での境界条件

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} \Big|_{y'=0} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \Big|_{y'=0} \dots (13)$$

より、解くべき境界積分方程式は

$$\begin{aligned} & \frac{i}{\rho\omega} \int_{-B/2}^{\infty} p_D(x, 0) \frac{\partial}{\partial y} S(x', y'; x, 0) \Big|_{y'=0} dx \\ & = -\int_{-\infty}^{\infty} v_I(x, h) \frac{\partial}{\partial y} S(x', y'; x, h) \Big|_{y'=0} dx \dots (14) \end{aligned}$$

となる。この方程式を解くことにより浮体底面での圧力が求まる。また海震荷重 F を

$$F(x, y; t) = \text{Re}[f(x, y; \omega) \cdot e^{i\omega t}] \dots (15)$$

とくと、周波数領域での海震荷重は次のようになる。

$$\begin{aligned} f &= -i\rho\omega \int_{-B/2}^{B/2} \phi_D(x, 0) \cdot n dx \\ &= \int_{-B/2}^{B/2} p_D(x, 0) dx \dots (16) \end{aligned}$$

2.3 海震荷重による浮体の弾性応答

発散波問題に関しては、運動モードについて

$$\phi_{Rn}(x', y') = -\frac{i}{\rho\omega} \int_{-B/2}^{B/2} p_{Rn}(x, 0) \frac{\partial}{\partial y} S(x', y'; x, 0) dx \dots (17)$$

となる。また浮体の振動変位を $z(x)$ とし、弾性を考慮すると両端自由梁の運動方程式は次のようになる。

$$EI \frac{d^4}{dx^4} z(x) - \rho(\omega^2 T - g) z(x) + p_R(x) = -p_D(x) \dots (18)$$

E はヤング率、 I は断面 2 次モーメント、 T は吃水、浮体の単位面積あたりの重量は一律で $\rho g T$ であるとする。

(18) 式の両辺を $\rho\omega^2$ で割ると次のようになる。

$$T \left\{ \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 + \frac{g}{T\omega^2} - 1 \right\} z(x) = -\frac{p_{Rn}(x) + p_D(x)}{\rho\omega^2} \dots (19)$$

$$\frac{EI}{\rho T \kappa_n} = \omega_n^2, \quad \kappa_n = \left(\frac{1}{\mu_n} \right) \dots (20)$$

ここで、 κ_n は固有振動モード関数、 μ_n は固有値である。 $u_n(x)$ をモード形として、働く力を

$$F_{n,m} = \frac{1}{\rho\omega^2} \int_{-B/2}^{B/2} p_{Rn}(x) u_m(x) dx \dots (21)$$

$$F_m = \frac{1}{\rho\omega^2} \int_{-B/2}^{B/2} p_D(x) u_m(x) dx \dots (22)$$

とおき、(19) 式の両辺に $u_m(x)$ をかけて積分すると

$$T \left\{ \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 + \frac{g}{T\omega^2} - 1 \right\} q_m = \sum_{n=0}^{\infty} q_m F_{n,m} = -E_n \dots (23)$$

となる。ここで q_m はモード解析における m 次の基準座標である。この (23) 式を解いて得られる q_m を

$$z(x) = \sum_{m=0}^{\infty} q_m u_m(x) \dots (24)$$

とすることにより、浮体の変位が得られる。

2.4 時間領域解析

地震は数十年に一度、20 秒程度出現する非定常かつ短時間な現象であるため、その出現頻度や大きさを確率論的に扱うことは困難である。また海底地盤の特性により

振動の卓越周期が異なるので海震荷重の推定は、その構造物の設置海域で予想される卓越周期の地震波形を入力とし、その波形に対する外力推定を直接行う必要がある。ここでは、過渡的応答現象の解析によく用いられる時間領域計算法を適用し、海震荷重の周波数解析の計算結果より求めたインパルス応答関数と、実際の地震動の上下加速度時系列の畳み込みにより直接海震荷重の時系列を求める方法を示す。

海震荷重の伝達関数を $f(\omega)$ とすると、海震外力のインパルス応答関数 $G(t)$ は

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} f(\omega) \cos \omega t d\omega \quad \cdots \cdots (25)$$

により求められる。よって、海底地盤面の上下加速度を $\eta(t)$ とすると海震荷重の時系列 $F(t)$ は

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau) G(t-\tau) d\tau \quad \cdots \cdots (26)$$

により得られる。但し、 $t-\tau < 0$ で応答は存在しない。浮体の弾性応答に関しても同様にして解析する。

3. 水槽実験

本数値解析の妥当性の検証を行い、海震現象の周波数基本特性を把握するために、水槽実験を行った。これまでに海震現象を把握するため、加震器によって疎密波を発生させた実験的研究はあるが(川西ら, 1987; Baba, 1987)、加震器では、本研究の対象としているような浅海域では、その周波数帯が高周波数である海震の共振現象を再現するには限界があると考えられる。そこで本実験では海震によって起こる疎密波を実際に音波を用いて再現した。

3.1 実験手法

実験は日本大学理工学部海洋建築工学科の平面水槽(19.0[m]×7.0[m]×1.0[m])を使用し、水底に設置した水中スピーカーから音波を発生させ、浮体モデル底面の圧力を圧力センサーにより測定した。

実験に使用した模型は2.0[m]×0.4[m]×0.04[m]の発泡スチロールを使用した。また、剛体モデルでの実験を行うために、浮体が大きな弾性変形しないように底面にアルミ板を取り付けた。実験モデルの詳細を図-2、図-3に、実験スケールの諸元を表-1に示す。

3.2 理論値との比較及び考察

今回の実験によって得られた結果を、本数値解析結果と比較を行った。但し、(12)式では振動地盤幅を無限大としているので、実験の条件と合わせるために、振動地盤面の長さは有限の幅にして数値計算を行った。

この数値計算による圧力と、実験によって得られた圧

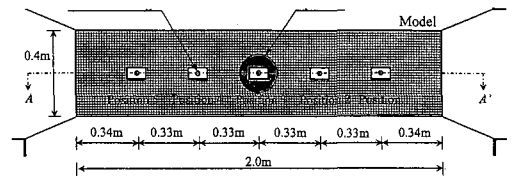


図-2 実験モデル (平面図)

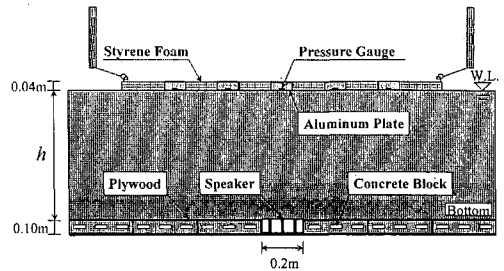


図-3 実験モデル (A-A' 断面図)

表-1 実験概要

	Real model	Experimental model
Scale [m]	1400.0×280.0	2.0×0.4
Length of vibrate ground [m]	140.0	0.2
Water depth [m]	75.0, 100.0, 200.0	0.1, 0.14, 0.28

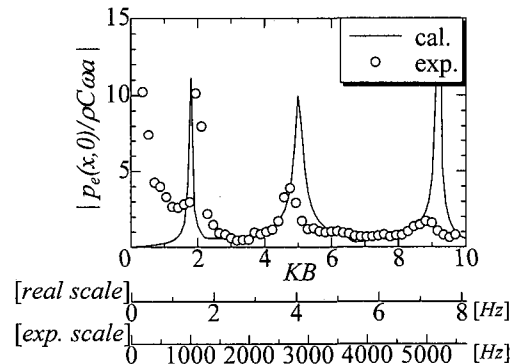


図-4 浮体モデル中心部の圧力

力を無次元化して図-4に示す。横軸は無次元周波数KBと、実験の際水中スピーカーで出力した周波数[Hz]及びその実機での周波数である。水深は実機スケールで200.0[m]、浮体幅Bは280.0[m]のもので比較を行った。実験で出力した周波数は、水深が浅いため、実機の周波数に比べ非常に高周波になることが分かる。数値計算結果及び実験値を見るとどちらも海震荷重の共振点の存在が確認できるが、ピークの周波数の位置に若干の差があ

る。

この原因としては、1つは数値解析では2次元の数学モデルを使用しているのに対して、実験は3次元モデルを使用しているためであると考えられる。また、数値解析では水底は剛体で水平であるとしており、水底での疎密波エネルギーの吸収及び散乱によるエネルギー減衰は考えていないのに対して、実験では疎密波の吸収及び散乱があったために、その共振周波数に差が出たとも考えられる。しかしながら、海震現象の定性的な特性はこの実験によって把握でき、本数値解析法の妥当性も確認された。

4. 数値計算モデル

数値計算に用いた超大型浮体の諸元を表-2に示す。

表-2 数値計算モデル

Length (L) [m]	4770.0
Breadth (B) [m]	1710.0
Draft (T) [m]	2.0
Stiffness (EI) [kg・m ²]	8.5367×10^9
Sound speed in water (15°C) (C) [m/sec]	1468.0
Water depth (h) [m]	20.0
Oscillation displacement of ground (a) [m]	0.01

5. 結果及び考察

5.1 海震荷重

図-5に海震荷重の浅海域での周波数応答を示す。この計算結果から、荷重が非常に大きな値になっている周波数が見られるが、これは浮体の両端から出る音波が干渉して起こる、浮体下での水平方向の定在波の影響（望月ら、1996）であると思われ、周波数が $KB=(2n+1)\pi$ ($n=1, 2, \dots$)のところで大きな値になっている。またこのような比較的水深の浅い場合、この共振周波数がほぼ $KB=(2n+1)\pi$ と決まってくるので、その共振周波数は予測できると考えられる。

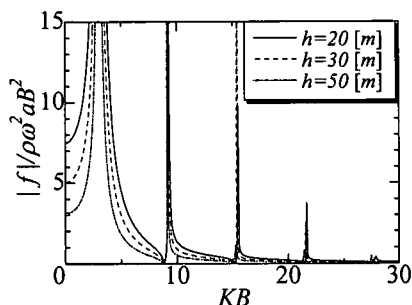


図-5 浮体に働く海震外力

5.2 浮体の弾性応答

境界積分方程式で求めた海震荷重を外力とし、モード解析法を用いて弾性応答を計算した結果を示す。図-6は、海震による浮体下での水平方向の定在波によって、

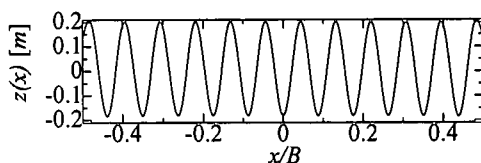


図-6 浮体の弾性応答 ($KB=\pi$)

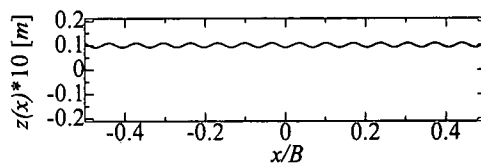


図-7 浮体の弾性応答 ($KB=2\pi$)

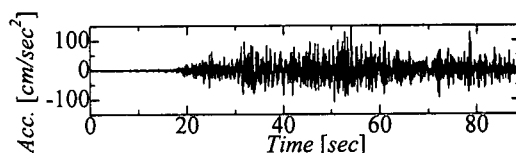


図-8 入力地盤上下加速度（十勝沖地震）

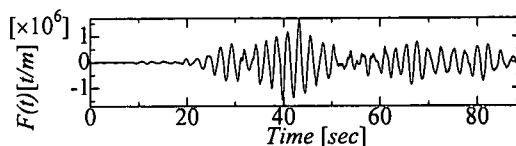


図-9 浮体に働く海震荷重

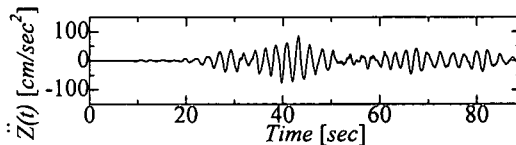


図-10 浮体の上下加速度

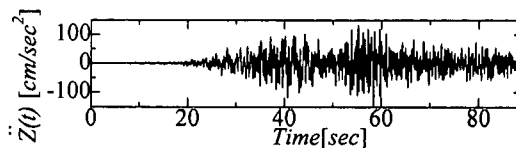


図-11 弾性浮体中心部における上下加速度

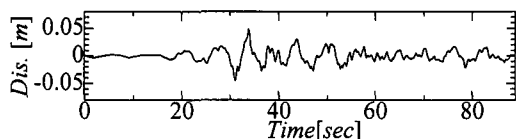


図-12 入力上下地盤変位 (十勝沖地震)

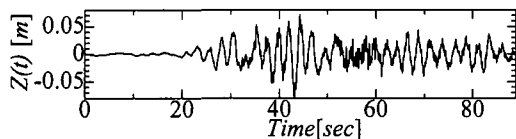


図-13 弾性浮体中心部における上下変位

共振が発生する周波数における浮体の幅方向の変位の状態を、図-7にはその共振が発生しない周波数での変位を10倍の値で示す。これら計算結果より、浮体の応答変位は海震荷重の共振周波数と同じ周波数で大きくなることが確認できる。

5.3 時間領域解析

周波数領域の数値解析結果より、浮体に働く海震荷重が非常に大きくなる周波数が多数あり、この荷重を時間領域に変換してみなければ、実現現象の理解は困難であることが分かった。そこで、ここではまず周波数領域から時間領域に変換した海震荷重の妥当性を検証し、次に海震によって超大型浮体に働く具体的な荷重及び応答を算定する。

図-8に入力の時系列データとして十勝沖地震の上下加速度の時系列を示す。この時系列データを海底地盤の上下方向加速度と等しいと仮定して求めた、浮体に働く海震荷重の時系列の計算結果を図-9に示す。計算結果は非常に大きな値が出てきているが、この値を用い、剛体モードの浮体上下加速度を計算した値を図-10に示す。この値と図-8の地盤の加速度を比較すると、上下加速度のオーダーは合っているので、図-9の計算結果は妥当であると考えられる。

次に弾性振動を考慮した浮体中央部の応答加速度を図-11に示す。また十勝沖地震の地盤の変位を図-12に、その変位が海底地盤で起きたときの浮体中央部の応答変位を図-13に示す。浮体の上下加速度は地盤の上下加速度である図-8と比べると、弾性振動を考慮しても入力の加速度とあまり変わらないことが分かる。また、その変位は地盤の変位に比べ多少大きなものとなっている。これは海震による疎密波のエネルギーが、浮体の弾性振動応答のエネルギーに還元されていることが原因で

あると考えられる。また、この傾向はその入力地震波の持つ周波数成分によって、変わるものと考えられ、耐震設計においては構造物の設置海域における地震波の特性を十分把握しておくことが重要であると考えられる。

6. 結 言

本研究で得られた結論は以下のようになる。

- 1) 超大型浮体に働く海震荷重の数値解析を行い、その結果を水槽実験における結果と比較することにより、本数値解析法の有用性を確認した。またこの実験において、海震による浮体と地盤の間での共振周波数の存在を改めて確認した。
- 2) 超大型浮体の弾性応答をモード解析法を用いて周波数領域解析を行った結果、その応答は外力である海震荷重の共振周波数と同じ周波数で大きくなることを確認した。
- 3) 時間領域の解析結果より、浮体の応答は、海震荷重の周波数特性と、入力する地震波形が持つ周波数成分に依存していると考えられ、超大型浮体の耐震設計においては、構造物の設置海域における地震波の特性を十分把握し、海震による外力が大きくなることのないよう配慮することが重要であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、多大なるご意見、ご指導を頂いた元日本大学非常勤講師・別所正利教授、東京大学生産技術研究所・前田久明教授に深く感謝します。

参 考 文 献

- 川西利昌, 池田信昭, 加藤 渉 (1987): 垂直地震動による緊張係留浮体の応答, 日本造船学会論文集, 第161号, pp. 307-315.
- 清川哲志 (1996): 浅海域における海震について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 966-970.
- 肥後靖・植野秀樹 (1997): 海震によって三次元浮体に働く荷重に関する研究, 日本造船学会論文集, 第182巻, pp. 375-380.
- 増田光一, 清水建一郎, 別所正利 (1997): 超大型浮体式構造物における海震時の応答推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1021-1025.
- 望月幸司・木原一・高木健・内藤林 (1996): 海震が沿岸域浮体構造物に及ぼす影響に関する研究, 関西造船学会誌, 第227号, pp. 83-88.
- Baba, E. (1987): A Study on the effect of seaquakes on a floating body, 日本造船学会論文集, 162号, pp. 90-98.
- Kobayashi, H., M. Sakuta, K. Okamoto, S. Hirakawa (1992): Safety consideration of TLP on earthquake wave propagated through seawater, OTC 6888, pp. 139-145.