

超大型浮体式海洋構造物における海震時の 応答推定法に関する研究

増田 光一*・清水建一郎**・別所 正利***

1. 緒 言

海洋空間の有効利用を目的とした超大型浮体式海洋構造物の実現のために、現在多くの研究が行われている。これらの研究のほとんどは、風、波、潮流などの常時外力の算定法とそれによる超大型浮体式構造物の応答に関する研究である(Maeda ら, 1996)。しかしながら、地震発生時の超大型浮体式構造物に働く地震荷重の影響に関する系統的な研究は少なく(清川, 1996; Baba, 1987; Kobayashi ら, 1992)、その構造物に対する影響については、明白になっていないのが現状である。この浮体式構造物に影響を与えるような地震は、海底の上下動によって起こる海震と呼ばれるもので、海底面の振動が疎密波として水中を伝播し浮体に伝わる現象である。この海震により浮体式構造物が倒壊するような決定的な被害を受けたという報告はないが、地震国である我が国では、海震の影響を明確にしておくことは、超大型浮体式海洋構造物の実現のために必要不可欠な研究課題であると考えられる。

そこで、本論文では、超大型浮体式海洋構造物に働く海震荷重の数値シミュレーション法を開発し、本数値シミュレーション法を基にして海震荷重が超大型浮体式海洋構造物に与える影響を数値的に明確にすることを目的とする。そのため、まず海震荷重の基本特性を把握するために、周波数領域での海震荷重の近似式を導き、その数値計算結果と境界積分方程式による数値計算結果とを比較することによりその有用性を確認する。また、超大型浮体式構造物の使用用途として海上空港等を想定した場合、設置される海域は水深の浅い沿岸域であることが予想され、その極浅海域における海震の影響の検討が必要であると考えられる。本近似式ではこのような極浅海域における海震の影響についても考慮し、実施設計にお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を取得する。

2. 理論計算

本論文では、地震による疎密波の伝播を地盤→水中→浮体という過程で考え、この現象を簡単のために2次元問題の数学モデルとして取り扱う。さらに、浮体に働く海震の変動圧は、その周波数が高いので短波長近似の仮定を基に近似式を導く。また、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する。

2.1 基礎方程式と核関数

流体は非粘性、非回転の圧縮性流体であると仮定する。座標系は、図-1に示すように水深 h の静水面上に x 軸、鉛直下向きに y 軸をとって定義する。このような海域において、海底が上下方向に角振動数 ω で調和振動していると考え、静水中には幅 B の浮体が存在しているとし、海底の振動によって流体内に疎密波(音波)が伝播し、浮体に影響を及ぼすとする。但し、今回の計算では、超大型浮体式構造物を想定しているため、浮体の吃水は浮体の幅に比べ十分小さいとし、浅吃水の仮定が成り立つものとする。

このとき流体運動は速度ポテンシャルによって記述でき、ここではそれを周波数領域で解析することとし、海底の地盤振動による疎密波の速度ポテンシャルを

$$\phi_1(x, y, t) = \text{Re}[\phi_1(x, y) \cdot e^{i\omega t}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

$$\phi_0(x, y, t) = \text{Re}[\phi_0(x, y) \cdot e^{i\omega t}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおく。散乱波の速度ポテンシャルは Helmholtz 方程式(別所ら, 1982)

$$\Delta\phi_0 + K^2\phi_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

を支配方程式とし、各境界上で以下の境界条件と発散波の条件を満足しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} [F] \phi_0 &= 0 && \text{on } S_F \\ [B] \frac{\partial \phi_0}{\partial n} &= 0 && \text{on } S_B \\ [H] \frac{\partial \phi_0}{\partial n} &= -\frac{\partial \phi_1}{\partial n} && \text{on } S_H \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $K(\omega/C)$ は波数、 C は水中音速である。

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

** 日本大学大学院 理工学研究科

*** 工博 日本大学非常勤講師 理工学部海洋建築工学科

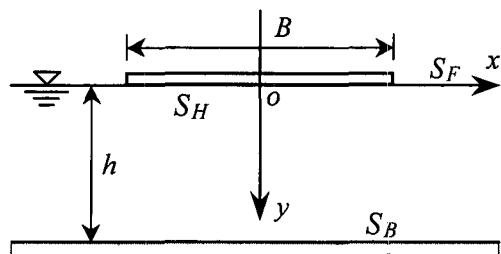


図-1 座標系

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。また, n は境界の上に立てた流体中に向かう単位法線を表す。

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, ここでは地震動の周波数は比較的高周波と考え, 流体内を疎密波(音波)のみが伝播し, 自由表面は変動しないものとする。

(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

$$\begin{aligned} S(x', y'; x, y) &= \frac{i}{4} \sum_{m=-\infty}^{\infty} [H_0^{(2)}(K\sqrt{(x-x')^2 + (y-y'+4mh)^2}) \\ &\quad + H_0^{(2)}(K\sqrt{(x-x')^2 + (y+y'-2h-4mh)^2})] \\ &\quad - \frac{i}{4} \sum_{m=-\infty}^{\infty} [H_0^{(2)}(K\sqrt{(x-x')^2 + (y-y'-2h+4mh)^2}) \\ &\quad + H_0^{(2)}(K\sqrt{(x-x')^2 + (y+y'-4mh)^2})] \\ &= -\frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left\{\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{\pi y}{h}\right\} \sin\left\{\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{\pi y'}{h}\right\} \\ &\quad \cdot \frac{e^{-q_n \frac{\pi |x|}{h}}}{q_n} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\xi = x - x' \dots\dots\dots (6)$$

$$q_n = \begin{cases} \sqrt{\left(n+\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2} & \text{for } \left(n+\frac{1}{2}\right)^2 > \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 \\ i\sqrt{\left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 - \left(n+\frac{1}{2}\right)^2} & \text{for } \left(\frac{Kh}{\pi}\right)^2 > \left(n+\frac{1}{2}\right)^2 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

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

浮体は水面の圧力分布で表されるとすると, その速度ポテンシャル ϕ_D は

$$\phi_D(x', y') = -\int_{-B/2}^{B/2} \mu(x, 0) \frac{\partial}{\partial y} S(x', y'; x, 0) dx \dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu(x, 0) &= \frac{i}{\rho\omega} p_D(x, 0) = \phi_D(x, 0) \\ p_D(x, 0) &= -i\rho\omega\phi_D(x, 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

と表すことができる。但し ρ は流体の密度である。

入射波の速度ポテンシャル ϕ_I は海底地盤の鉛直方向速度を $v(x, h)$ とすると

$$\phi_I(x', y') = -\int_{-\infty}^{\infty} v(x, h) S(x', y'; x, h) dx \dots\dots (10)$$

と表せるので, 解くべき境界積分方程式は

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial y} \Big|_{y'=0} = \frac{\partial \phi_I}{\partial y} \Big|_{y'=0} \dots\dots\dots (11)$$

であるから, (8)式, (10)式より

$$\begin{aligned} &\int_{-B/2}^{B/2} \mu(x, 0) \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S(x', y'; x, 0) \Big|_{y'=0} dx \\ &= -\int_{-\infty}^{\infty} v(x, h) \frac{\partial}{\partial y'} S(x', y'; x, h) \Big|_{y'=0} dx \dots\dots (12) \end{aligned}$$

と表すことができる。(12)式により浮体底面の圧力を求め, それを浮体幅で積分することにより, 浮体にかかる地震荷重を求める。

2.3 地震荷重の近似値

地震による水圧変動は周波数が高いのでその波長は水深及び浮体寸法に比べてかなり小さいと考えられる。そうすると, そこで現れる積分は漸近展開でき, 大変簡単で見通しのつきやすい形に整理できると考えられる。

核関数 S は ξ 方向に指数的に減衰するか, もしくは激しく振動する関数であるから, v が S に比べて緩やかに変動する関数であるとする (10)式は近似的に次のように積分できる。

$$\phi_I(x', y') = v(x', h) \int_{-\infty}^{\infty} S(x', y'; x, h) d\xi \dots\dots (13)$$

特に海底 ($y'=h$) では次のようになる。

$$\phi_I(x', h) = -\frac{1}{K} v(x', h) \tan kh \dots\dots\dots (14)$$

ここで $v(x', h)$ は地震によるものを考えようとしている訳であるが, 地盤が岩石等である場合は P 波, S 波, レーリー波の波数を K_P, K_S, K_R , 伝搬速度を C_P, C_S, C_R とし, 水中音速を C とすると

$$K_P < K_S < K_R \ll K, C_P > C_S > C_R \gg C \dots\dots\dots (15)$$

となっているので, v は水中音速に比べて緩やかに振動すると考えることは許されるであろう。(14)式から海底の圧力 $p(x', h)$ は次式で与えられる。

$$p(x', h) = -i\rho\omega\phi_I(x', h) = i\rho C v(x', h) \tan Kh \dots\dots (16)$$

また水面の垂直速度 $v(x', 0)$ は

$$v(x', 0) = -\int_{-\infty}^{\infty} v(x, h) \frac{\partial}{\partial y} S \Big|_{y'=0} dx = -\frac{v(x', h)}{\cos Kh} \dots\dots\dots (17)$$

となる。(16)式も (17)式も $Kh = (n+1/2)\pi$ で無限大となるが, これは海底と水面との間で音源が共振する周波数であると考えられる。

また, 浮体の吃水は充分浅いので, 速度ポテンシャル

は水面における圧力分布で表現でき

$$\phi(x', y') = \frac{1}{i\rho\omega} \int_{-B/2}^{B/2} p(x, 0) \frac{\partial}{\partial y} S dx \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。そうすると浮体表面での境界条件は

$$v(x', 0) = \frac{\partial}{\partial y} \phi(x', 0) = \frac{1}{i\rho\omega} \int_{-B/2}^{B/2} p(x, 0) \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S dx \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。ここで、前同様、近似的に

$$v(x', 0) = \frac{1}{i\rho\omega} p(x', 0) I(x', 0; x, 0) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\begin{aligned} I(x', y'; x, y) \\ = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S \Big|_{y=y'=0} d\zeta \approx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S \Big|_{y=y'=0} d\zeta \\ = -K \tan Kh \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

とおくと

$$v(x', 0) = \frac{i}{\rho C} p(x', 0) \tan Kh \quad \dots\dots\dots (22)$$

あるいは

$$p(x', 0) = -i\rho C v(x', 0) \cot Kh \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。水面の速度は (17) 式により水底の速度で表されるから

$$p(x', 0) = \frac{i\rho C}{\sin Kh} v(x', h), \text{ for } |x| \leq B/2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。それ故この速度を地震による水底の速度とするとその上下方向の力は

$$f = \int_{-B/2}^{B/2} p(x', 0) dx = \frac{i\rho C}{\sin Kh} \int_{-B/2}^{B/2} v(x', h) dx \quad \dots\dots\dots (25)$$

と近似的に与えられる。

2.4 極浅海域での海震荷重の近似値

現在考えられている超大型浮体式構造物の設置海域の水深は、その構造物幅に比べ非常に浅くなることが考えられる。水深 h が小さくなって $Kh = 2\pi h/\lambda \ll 1$ (λ : 疎密波の波長) になると境界積分方程式では $KB \approx (2n+1)\pi$, ($n=0, 1, 2, \dots$) のところで非常に大きな値になり、(25) の近似式が成り立たなくなると考えられる。これは $B/\lambda \approx (n+1/2)$ ということであるから、両端から出る音波が干渉していることを意味する(望月ら, 1996)。よって浮体の外側では $Kh > \pi/2$ で進行波はなくなるが、浮体底面では

$$\phi(x, y) = A' \cos Kx \quad \dots\dots\dots (26)$$

という定在波が存在していると考えられる。ここで A' は未知数である。

そこで $|x| < B/2$ (B : 浮体幅) で散乱問題について

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y) \\ &= -\frac{v \cos Ky}{K \sin Kh} + A' \cos Kx \quad \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

とおくと、底面の圧力は

$$\begin{aligned} p(x, 0) &= -i\rho\omega \{ \phi_1(x, 0) + \phi_2(x, 0) \} \\ &= -i\rho\omega \left(-\frac{v}{K \sin Kh} + A' \cos Kx \right) \quad \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

となるので海震荷重を無次元値で求めると

$$|f| = \int_{-B/2}^{B/2} p dx = i\rho\omega \left[\frac{vB}{K \sin Kh} - \frac{2A'}{K} \sin \frac{KB}{2} \right] \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\frac{|f|}{\rho\omega^2 a B^2} = \frac{-1}{KB \sin Kh} + \frac{2A'}{KvB^2} \sin \frac{KB}{2} \quad \dots\dots\dots (30)$$

となる。ここで $v = i\omega a$ (a : 地盤振動振幅) である。

さて、 $|x| > B/2$ では A'' を未知数とすると

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y) \\ &= \frac{v \sin Ky}{K \cos Kh} + A'' \sin \left(\frac{\pi}{2h} \right) e^{-\mu' x} \quad \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

$$\mu' = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\pi}{2h} \right)^2 - K^2} & \text{for } \left(\frac{\pi}{2h} \right)^2 > K^2 \\ i\sqrt{K^2 - \left(\frac{\pi}{2h} \right)^2} & \text{for } K^2 > \left(\frac{\pi}{2h} \right)^2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (32)$$

となる。ここで左右対称なので $x > 0$ のみ考える。

内側と外側の速度ポテンシャルは $x = \pm B/2$ で連続しなければならないと考えると、内側の解は

$$\left. \begin{aligned} \phi\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -\frac{v \cos Ky}{K \sin Kh} + A' \cos \frac{KB}{2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \phi\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -KA' \sin \frac{KB}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33)$$

外側の解は

$$\left. \begin{aligned} \phi\left(\frac{B}{2}, y\right) &= \frac{v \sin Ky}{K \cos Kh} + A'' \sin \left(\frac{\pi y}{2h} \right) e^{-\frac{\mu' B}{2}} \\ \frac{\partial}{\partial x} \phi\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -\mu' A'' \sin \left(\frac{\pi y}{2h} \right) e^{-\frac{\mu' B}{2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (34)$$

であるが、今は近似的に平均値を合わせることにすると内側では

$$\left. \begin{aligned} \bar{\phi}\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -\frac{v}{K^2 h} + A' \cos \frac{KB}{2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \bar{\phi}\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -KA' \sin \frac{KB}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (35)$$

外側では

$$\left. \begin{aligned} \bar{\phi}\left(\frac{B}{2}, y\right) &= \frac{v(1 - \cos Kh)}{K^2 h \cos Kh} + \frac{2}{\pi} A'' e^{-\frac{\mu' B}{2}} \\ \frac{\partial}{\partial x} \bar{\phi}\left(\frac{B}{2}, y\right) &= -\frac{2}{\pi} \mu' A'' e^{-\frac{\mu' B}{2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (36)$$

となる。これら (35), (36) 式より未知数 A', A'' が求まり、それを (30) 式に代入すると

$$\frac{|f|}{\rho\omega^2 aB^2} = \frac{-1}{KB \sin Kh} + \frac{2 \sin \frac{KB}{2}}{K^3 B^2 h \cos Kh \left(\cos \frac{KB}{2} - \frac{K}{\mu} \sin \frac{KB}{2} \right)} \quad (37)$$

となり、海震荷重の無次元値がもとまる。この (37) 式の右辺に $\cos Kh$ をかけると放射問題での解になる。

3. 数値計算結果と考察

まず (25) 式の近似式による数値計算結果と境界積分方程式による数値計算結果の比較検討を行う。図-2 に $h/B=0.5$ のときの両式の数値計算結果を示す。高周波数域では両計算値はよい一致を示しているが、その低周波数域を拡大して示した図-3 では、近似値のピークの位置が境界積分方程式のピークの位置よりも低周波数側にずれており、計算値が一致していない。これは、近似式が浮体の直下の地盤の振動しか影響を考えていないのに対して、境界積分方程式では地盤面はすべて振動していると考えているので、水深が増加すると浮体の直下以外

の地盤面の振動の影響が現れてくるためにこの差が出てくることが考えられる。したがって、次に水深を比較的浅くした $h/B=0.1$ のときの計算を行ってみた。その計算結果を図-4 に示す。ここでは近似式と境界積分方程式による計算結果の傾向は一致しておりピークのずれは見られない。

よって、これは水深が浅くなると、浮体の直下以外の地盤面の振動の影響は現れないことを示しており、またこの近似式はこのような水深で有用であることを表して

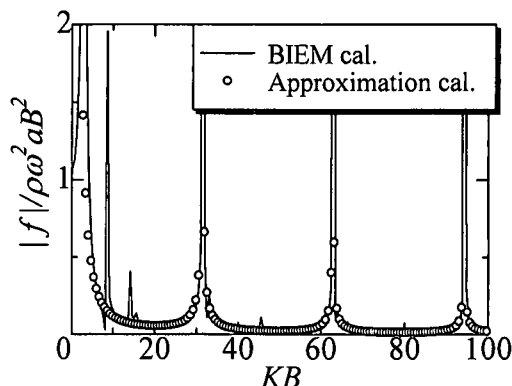


図-4 海震荷重の計算結果 ($h/B=0.1$)

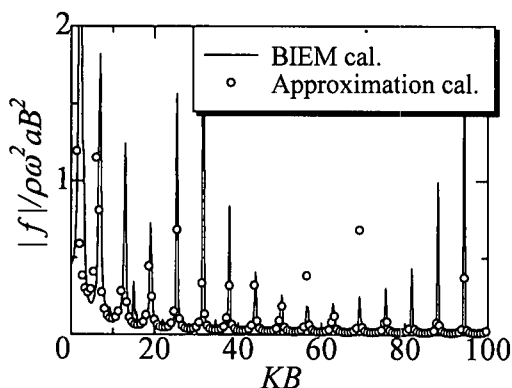


図-2 海震荷重の計算結果 ($h/B=0.5$)

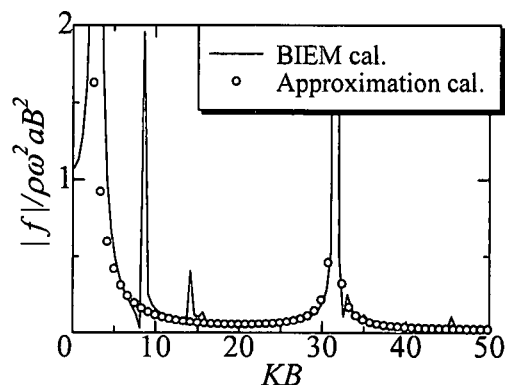


図-5 海震荷重の計算結果 (図-4 の低周波域拡大)

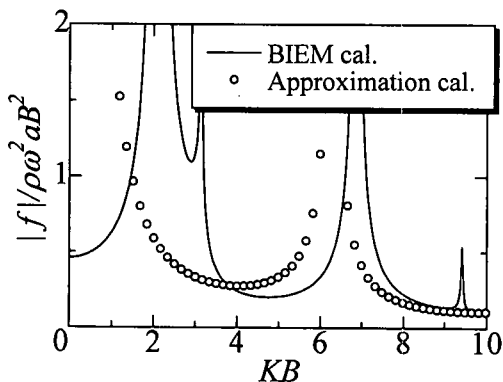


図-3 海震荷重の計算結果 (図-2 の低周波域拡大)

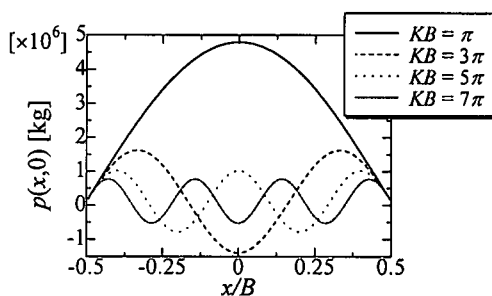


図-6 海震荷重による浮体底面の圧力分布

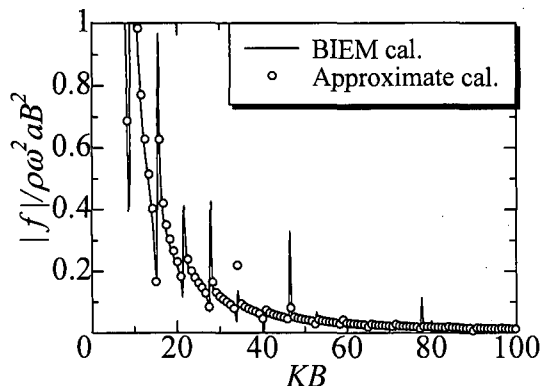
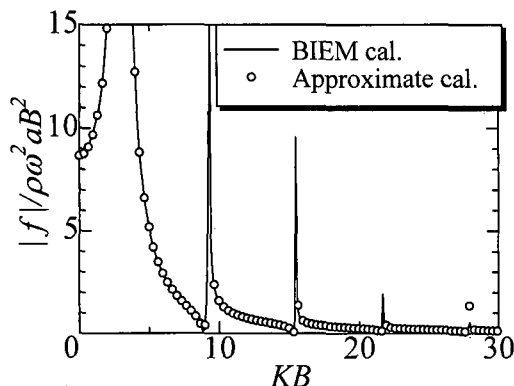
図-7 地震荷重の計算結果 ($h/B=0.01$)

図-8 地震荷重の計算結果 (図-7の低周波域拡大)

いる。しかし、図-4の低周波数域を拡大した図-5において、今度は極浅海域での地震の影響である、浮体下での水平方向の定在波による共振が境界積分方程式では顕著に現れてきているのに対して、近似式ではその共振が見られない。この共振点における浮体の底面での圧力分布を図-6に示す。境界積分方程式では、この値を積分して地震荷重を求めているのでその値は非常に大きなものとなる。

そこで、次に(37)式の極浅海域の近似式による数値計算結果と境界積分方程式による数値計算結果の比較検討を行う。図-7に $h/B=0.01$ のときの両式の数値計算結果を示す。両計算結果はよく一致しており、また、図-8のようにその低周波数域においても両数値計算は非常によく一致している。よって、この近似式の有用性が確認できたと考えられる。また、水深が浅くなると地震による浮体底面と海底地盤面の間の共振点は高周波数側に移動するので、浮体下での水平方向の定在波による共振

が設計時においては重要な要素になってくると考えられる。

4. 結 言

以上の結果を基に、本論では次の結論が得られた。

(1) 実際の設計に役立ち、超大型浮体式海洋構造物に働く地震荷重の基本特性を把握することができる近似式を導き、境界積分方程式による数値計算結果と比較することにより、本近似式の有用性を確認できた。

(2) 境界積分方程式の数値計算の結果、地震荷重の共振点は浮体と海底との間での共振だけでなく、浮体下での水平方向の定在波による共振も存在することを確認した。この共振は水深が浅くなると顕著に現れることが分かり、極浅海での近似式においてもその共振の存在を確認した。また、浮体式構造物では水深が浅くなると、浮体の直下以外の地盤面の振動の影響はあまりなくなると考えられ、極浅海での近似式はこのような水深での地震荷重算定に有用であることを確認した。よって、この極浅海における近似式において超大型浮体式海洋構造物の地震荷重の影響を明確にしたと考えられる。

(3) 超大型浮体式構造物では水深が相対的に非常に浅くなり、海底と浮体の間での共振点は高周波数側に移動する。よって、その共振よりも浮体下での水平方向の定在波による共振が超大型浮体式構造物の実施設計においては重要な検討要素となることが考えられる。

謝辞：東京大学生産技術研究所・前田久明教授には多くのご助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 清川哲志 (1996): 浅海域における地震について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 966-970.
- 別所正利・河辺 寛 (1982): 一様媒質の無限領域における2次元弾性波の放射散乱について, 防衛大学校理工学研究報告, 第20巻, 第4号, pp. 343-381.
- 望月幸司・木原 一・高木 健・内藤 林 (1996): 地震が沿岸域浮体式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, OTC6888, pp. 139-145.
- Maeda, H., K. Masuda, S. Miyajima, T. Ikoma (1996): Hydroelastic responses of pontoon type very large floating offshore structure, Proceeding of the 15th International Conference on OMAE, Vol. I, pp. 407-414.