

超大型浮体式海洋構造物に働く海震荷重の 時刻歴応答推定法に関する研究

正員 別所 正利* 正員 前田 久明**
正員 増田 光一*** 学生員 清水 建一朗****

A Study on Prediction Method of Time History Response of Very Large Floating Offshore Structure by Sea Shock Force

by Masatoshi Bessho, *Member* Hisaaki Maeda, *Member*
Koichi Masuda, *Member* Kenichiro Shimizu, *Student Member*

Summary

The objectives of present paper are to derive the approximate solution for comparatively easily computing the sea shock forces on developing numerical simulation method of sea shock force and to clear the effect of sea shock forces on very large floating offshore structures by the present approximation. Therefore the approximation solution and the boundary integral equation method on frequency domain are derived to understand fundamental characteristics of sea shock force. Further the accuracy and the usefulness of the present approximation is confirmed by comparing the results by the present approximation with the numerical results by the boundary integral equation method.

Sea shock forces on very large floating structure are concretely understood by transforming numerical results in frequency domain into numerical results in time domain and basic data of earthquake-resistant design which is very important for implementation design is obtained.

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¹⁾である。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^{2),3),4),5)}、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現象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する上で、その荷重を比較的容易に算定できる近似式を導き、本近似式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を求める境界積分方程式を導き、その数値計算結果と近似式による数値計算結果とを比較することにより、近似式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する。

次に、この周波数領域での数値計算を時間領域に変換することにより、海震荷重の超大型浮体式構造物に対する影

* 研究当時日本大学理工学部海洋建築工学科

** 東京大学生産技術研究所

*** 日本大学理工学部海洋建築工学科

**** 日本大学大学院理工学研究科

原稿受理 平成9年7月10日

秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

響を具体的に把握し、実施設計において極めて重要であ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（音波）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、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、Fig. 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。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。

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られる。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中に疎密波（音波）が伝播し、浮体に影響を及ぼすと考える。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

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

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

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

とおく。散乱波の速度ポテンシャルは Helmholtz 方程式⁹⁾

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

を支配方程式とし、各境界上で以下の境界条件と無限遠の放射条件を満足しなければならない。

$$\left. \begin{array}{l} [F] \quad \phi_D = 0 \quad \text{on } S_F \\ [B] \quad \frac{\partial\phi_D}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_B \\ [H] \quad \frac{\partial\phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial\phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $K(=\omega/C)$ は波数、 C は水中音速である。

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、流体中に疎密波（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

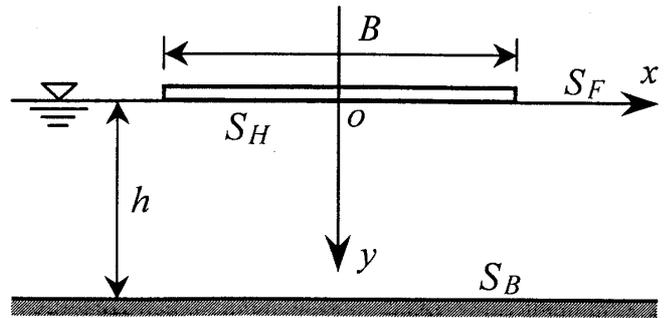


Fig. 1 Coordinate system

条件を満足する解である核関数は

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

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

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

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

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

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

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

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

と表せるので、解くべき境界積分方程式は

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

であるから、(8)式、(10)式より

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

$$= - \int_{-\infty}^{\infty} v(x, h) \frac{\partial}{\partial y'} S(x', y'; x, h) \Big|_{y'=0} dx \quad (12)$$

と表すことができる。(12)式により $\mu(x, 0)$ が求まるので、(9)の関係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、浮体にかかる海震荷重を求める。

2.3 海震荷重の近似値

海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。

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

特に海底 ($y' = h$) では次のようになる。

$$\phi_I(x', h) = \frac{1}{K} v(x', h) \tan Kh \quad (14)$$

ここで $v(x', h)$ は地震によるものと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

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

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ものと考えられる。これは海底の圧力 $p(x', h)$ は次式で与えられる。

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

また水面の垂直速度 $v(x', 0)$ は

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

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波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

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

となる。そうすると浮体表面での境界条件は

$$v(x', 0) = \frac{\partial}{\partial y'} \phi(x', 0)$$

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

となる。ここで、前同様、近似的に

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

$$I(x', y'; x, y) = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S \Big|_{y=y'=0} dx$$

$$\approx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2}{\partial y \partial y'} S \Big|_{y=y'=0} dx$$

$$= -K \tan Kh \quad (21)$$

とおくと

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

あるいは

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

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

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

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

$$f = \int_{-B/2}^{B/2} p(x', 0) dx$$

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

と近似的に与えられる。

ところで、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と考えられる。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 $KB = (2n+1)\pi$, ($n=0, 1, 2, \dots$) 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 $B/\lambda = (n+1/2)$ であるから、浮体の両端から出る音波が干渉していることを意味している。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

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

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

$$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y)$$

$$= \frac{v \cos Ky}{K \sin Kh} + A' \cos Kx \quad (27)$$

とおくと、底面の圧力は

$$p(x, 0) = -i\rho\omega\{\phi_1(x, 0) + \phi_2(x, 0)\}$$

$$= -i\rho\omega\left(\frac{v}{K \sin Kh} + A' \cos Kx\right) \quad (28)$$

となるので、海震荷重を無次元値で求めると

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

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

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

$$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y)$$

$$= -\frac{v \sin Ky}{K \cos Kh} + A'' \sin\left(\frac{\pi}{2h}y\right)e^{-\mu'x} \quad (31)$$

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

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

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

外側の解は

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

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

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

外側では

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

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

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

となり、極浅海における超大型浮体式構造物にかかる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。

また、(28)式より

$$p(x, 0) = -\frac{i\rho Cv}{\sin Kh} + \frac{i\rho Cv \cos Kx}{Kh \cos Kh \left(\cos \frac{KB}{2} - \frac{K}{\mu'} \sin \frac{KB}{2} \right)} \quad (38)$$

となり圧力が求まる。

2.4 インパルス応答関数を用いた時間領域計算法

地震は数十年に一度、20秒程度出現する非正常かつ大変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ってく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、海震荷重による超大型浮体式構造物の周波数応答計算結果より求めた外力の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 $G(\omega)$ とすると海震外力のインパルス応答関数 $g(\tau)$ は

$$g(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty G(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (39)$$

により求められる。よって地震動上下加速度を $\eta(\tau)$ とすると海震荷重の時系列は

$$f(t) = \int_{-\infty}^t \eta(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad (40)$$

により求められる。但し、 $t-\tau < 0$ では応答は存在しない。

2.5 解析的応答時系列計算法

インパルス応答関数を用いた時間領域計算法では境界積分方程式で求めた周波数応答計算結果を用いて、外力のインパルス応答関数を求めている。しかし、周波数領域の計算結果では、浮体と地盤面の共振や浮体の幅方向の共振により無限大になるところが多数見られると考えられるので、この無限大の値をある値と見なして計算する方法では、正確な海震荷重を求めるのは困難であると考えられる。そこでこのような不具合を取り除くために、海震による外力の算定式を直接フーリエ逆変換することにより、海震外力による時系列を計算する方法を以下に示す。

$G(t)$ をインパルス応答関数、 $F(\omega)$ を外力の応答関数、 $v(\tau)$ を地震動上下速度、 $g(t)$ を海震荷重の時系列とすると

$$g(t) = \int_0^t v(\tau) G(t-\tau) d\tau \quad (41)$$

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (42)$$

となる。ここで(38)式を用いて浮体の中心 ($x=0$) の圧力の時系列を求めることにすると、 $G(t)$ は

$$G(t) = \frac{\rho C}{2\pi i} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{i\omega t}}{\sin Kh} d\omega - \frac{\rho C}{2\pi i} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{i\omega t}}{Kh \cos Kh \left(\cos \frac{KB}{2} - \frac{K}{\mu'} \sin \frac{KB}{2} \right)} d\omega \quad (43)$$

となる。これを(41)式に代入することにより圧力の時系列が求められる。

3. 数値計算結果及び考察

3.1 周波数領域での数値計算結果及び考察

まず境界積分方程式と海震荷重の近似値である(25)式による計算結果の比較検討を行う。Fig. 2 に $h/B=0.5$ のときの両式の数値計算結果を示す。計算値はどちらもオーダー

は合っているが、近似値の計算値のピークの位置が境界積分方程式の計算値のピークの位置よりも低周波数側に移動しており、計算値が一致していない。これは、近似式が浮体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全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、次に水深をさらに浅くした $h/B=0.1$ のときの計算を行った。その数値計算結果を Fig. 3 に示す。この場合では計算結果の傾向は一致している。よってこれは水深を浅くすると、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、近似式はこのような水深で有用であることを示している。しかし、今度は極浅海域の海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の影響が境界積分方程式の計算結果では顕著に現れてきている。

そこで、次に (37) 式の極浅海域での影響を考慮した近似式による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。Fig. 4 に $h/B=0.01$ の時の両式の数値計算結果を示す。両計算結果は非常によく一致しており、(37) 式の近似式の有用性が確認できた。

3.2 時間領域での数値計算結果及び考察

ここまでの周波数領域での計算で海震荷重の基本特性は把握でき、また近似式の有用性も確認できた。しかし、その計算結果より、海震荷重が無限大になる周波数があり、この海震荷重を時間歴に変換して見なければ、現実的な現象の理解は困難であることが分かった。

そこで、ここではまずインパルス応答関数を用いた方法で海震荷重の時系列を計算し、入力地震波と比較することによりその妥当性を確認する。次に解析的に時系列応答を計算する方法で、海震外力の時系列を計算し、これら2つの方法を比較することによりこの時系列計算法の妥当性の確認を行う。

Fig. 5 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、浮体にかかる海震荷重の時系列の計算結果を Fig. 6 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動を計算し、その値を加速度に変換した値を Fig. 7 に示す。この値と Fig. 5 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、Fig. 7 の計算結果は妥当であると考えられる。Fig. 8 には十勝沖地震による地盤の上下変位を、Fig. 9 にはそのときの海震による浮体の変位を計算した結果を示す。浮体の変位は地盤面の変位に比べて、非常に小さいものとなっている。但し、このインパルス応答関数の計算を行う時に用いる伝達関数の値は、境界積分方程式の数値計算結果を用いている。

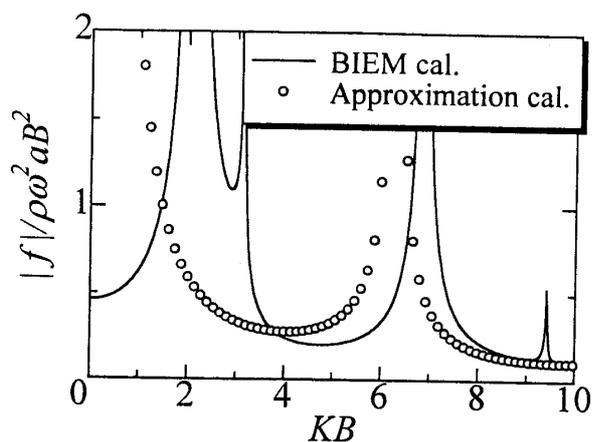


Fig. 2 Sea shock force of BIEM and approximate solution ($h/B=0.5$)

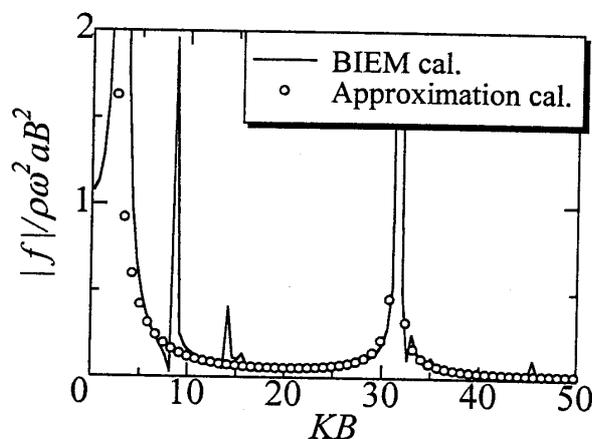


Fig. 3 Sea shock force of BIEM and approximate solution ($h/B=0.1$)

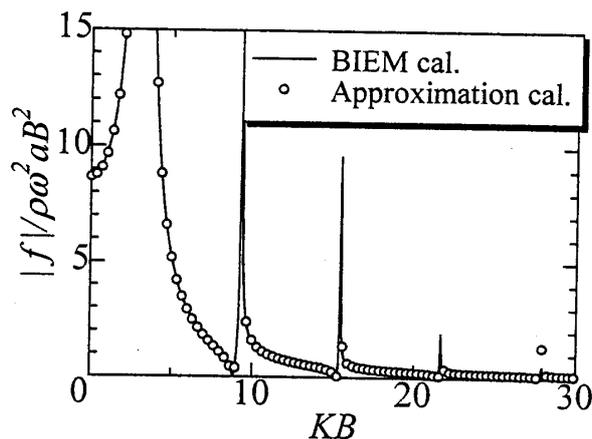


Fig. 4 Sea shock force of BIEM and approximate solution ($h/B=0.01$)

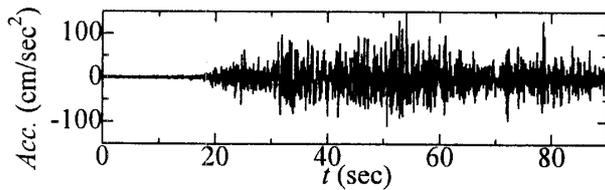


Fig. 5 Incident vertical acceleration

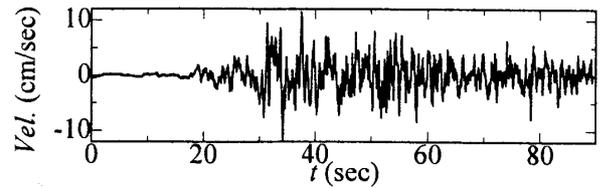


Fig. 10 Incident vertical velocity

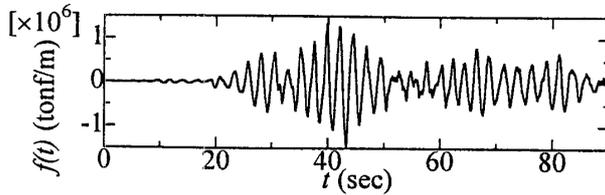


Fig. 6 Sea shock force for floating structure

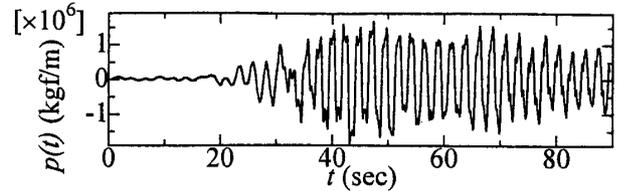


Fig. 11 Sea shock force for floating structure by analytical method

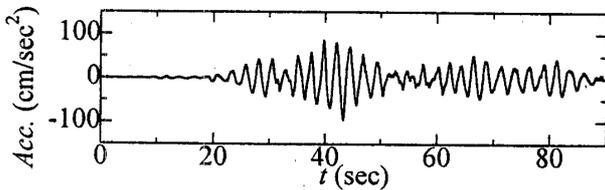


Fig. 7 Vertical acceleration of floating structure caused by sea shock force

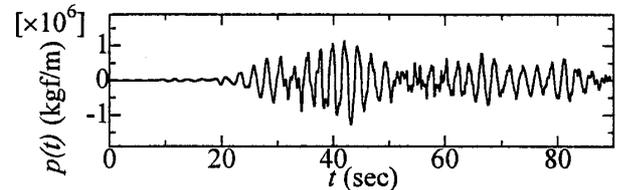


Fig. 12 Sea shock force for floating structure by impulse response function

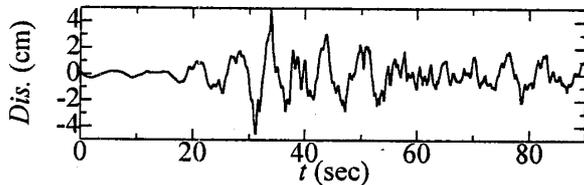


Fig. 8 Vertical displacement of ground

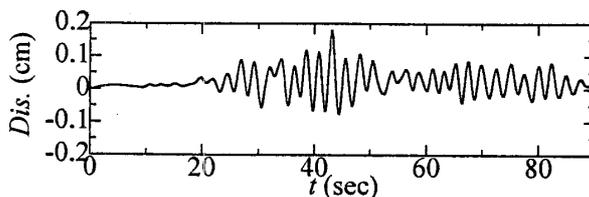


Fig. 9 Vertical displacement of floating structure caused by sea shock force

次に解析的に応答を計算する方法の検証を行う。Fig. 10に十勝沖地震の地盤の上下速度を、Fig. 11に解析的応答計算法によって計算した浮体中央の圧力を示し、Fig. 12にはインパルス応答関数を用いる方法によって求めた浮体中央の圧力を示す。この解析的方法ではインパルス応答関数を用いる計算結果より少し大きめに計算結果が出てきてい

る。この解析的方法では(41)式により畳み込み積分を行うときに全ての時間を考慮して積分を行っているのに対し、インパルス応答関数を用いる方法ではインパルス応答関数を計算する関係で前15秒の影響しか考えていないのが原因であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、地震時における超大型浮体式海洋構造物に働く海震荷重を周波数領域の数値計算を行うことによりその基本性質を把握し、次にその具体的影響を把握するために、周波数領域を時間領域に変換する数値計算を行った結果、次の結論が得られた。

- 1) 超大型浮体式海洋構造物に働く海震荷重の周波数領域で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した。
- 2) 周波数領域における数値計算結果において、海震荷重の共振点は浮体と海底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てくることが分かり、境界積分方程式だけでなく、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、浮体直下以外の地盤面の振動の影響はほとんどないと考えられ、極浅海での近似式はこのような水深での海震荷重算定に有用である。

- 3) 時間領域における数値計算結果において、十勝沖地震の上下加速度を海底の上下加速度とし、インパルス応答関数を用いて計算したときの海震荷重は非常に大きなものとなったが、この計算結果を用い剛体モードの浮体上下加速度を計算した結果、その値は入力加速度の値とあまり変わらないのでその妥当性が確認できた。またそのときの浮体の変位を計算した結果、海底地盤の変位に比べて非常に小さいことが分かった。
- 4) 解析的に時系列を求める方法においても同じように数値計算を行ったが、インパルス応答関数を用いて計算を行った結果と比較すると、多少大きめな計算結果となった。これは解析的に計算を行ったものは積分を行うときに、その時刻より前の影響を全て含んだ計算を行っていることが原因であると考えられる。しかし、ここでは海震現象を疎密波（音波）によるものとしているので、このように考えることは妥当であると考えられる。また、インパルス応答関数を用いる計算では、周波数での海震荷重の計算をフーリエ逆変換する際、海震荷重が無大となる値のある有限な値と仮定してフーリエ逆変換しているのに対し、解析的に計算を行う方法では、数式を直接フーリエ逆変換しているため、この計算値は妥当であると考えられる。
- 5) 以上の計算結果より、超大型浮体式海洋構造物は陸上の構造物に比べ、水平方向の揺れに対して免震性があると言われてきたが、鉛直方向の揺れに対しても免震性があることを確認した。今後は、超大型浮

体式海洋構造物を取り扱っているため、浮体を弾性体とした場合の応答について検討と、実験による数値シミュレーションの検証を行っていきたいと思う。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重なご意見、ご指導いただいた三井造船昭島研究所宮島省吾氏、東京大学生産技術研究所前田研究室諸氏、並びに日本大学増田研究室諸氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Maeda, H., Masuda, K., Miyajima, S., Ikoma, I.: Hydroelastic responses of pontoon type very large floating offshore structure, Proceeding of the 15th International Conference on OMAE, Vol. I, pp. 407-414, 1996.
- 2) 清川哲志：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, 1996.
- 3) 肥後靖，徳田浩二，矢定孝之，渡辺健一：浅海域における二次元音源による音響放射問題に関する研究，日本造船学会論文集，第172号，pp. 539-549, 1992.
- 4) Baba, E.: A study on the effect of seaquakes on a floating body, 日本造船学会論文集，第162号，pp. 90-98, 1987.
- 5) Kobayashi, H., M. Sakuta, K. Okamoto, S. Hirakawa: Safety consideration of TLP on earthquake wave propagated through seawater, OTC 6888, pp. 139-145, 1992.
- 6) 別所正利，河辺寛：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, 1982.
- 7) 望月幸司，木原一，高木健，内藤林：海震が沿岸域浮体構造物に及ぼす影響に関する研究，関西造船協会誌，第227号，pp. 83-88, 1997.