海底地盤の疎密波反射特性を考慮した浮体式構造物の 海震応答特性に関する研究

正員 別 所 正 利*

正員 増 田 光 一***

正員 居 駒 知 樹***

正員 前 田 久 明**

正員 高 村 浩 彰****

渡 辺 泰 洋*****

Study on Characteristics of Sea-shock Response of
Floating Structure Considering the Reflection Characteristics of Earthquake Waves

by Masatoshi Bessho, Member

Koichi Masuda, Member

Tomoki Ikoma, Member

Hisaaki Maeda, Member

Hiroaki Takamura, Member

Yasuhiro Watanabe

Summary

The objective of present paper is to examine the characteristics of sea-shock responses of floating structures by using practical method (so call impedance method) considering the effect of seabed. In the present paper, the impedance method, which was considered the reflection characteristics of earthquake wave by using impedance ratio, was formulated and the characteristics of hydrodynamic forces by present method was compared with the results by the method of elastic sea ground and wave tank experiments and evaluation method of optimum impedance ratio was discussed.

Furthermore, the characteristics for sea-shock response of floating structure were calculated by the impedance method with optimum impedance ratio and also these numerical results were discussed.

1. 緒 言

海底面の鉛直地震動が水中を疎密波（縦波）として伝播する「海震」と呼ばれる現象については、「座礁したときのような衝撃を受けた」等の船舶による被害記録¹⁾が残っており、浮体式構造物への影響が懸念されている。しかしながら、強地震観測の結果を期待することが難しく、水理模型実験²⁾による現象の再現が困難なため、数値計算による系統的な研究に頼られている³⁾。

著者らは、大規模な浮体式構造物を対象とした海震影響の検討結果^{4),5)}から、疎密波が進行波とならない低周波数帯にもかかわらず、定在波が発生する共振周波数が確認され、浮体式構造物並びに海底地盤表面に大きな動水圧が作用することを示した。しかし、海底面で水中疎密波が完全反射されると仮定した固定境界条件を採用していた（便宜上、剛底法と称す）。そのため、先報^{6),7),8)}において2次元鉛直断面領域を対象とし、半無限均質弾性体を仮定した海底地盤を考慮した境界積分方程式を誘導すると共に海底地盤の影響について検討した（便宜上、弾性地盤法と称す）。この結果、海底地盤面における境界条件の相違によって、動水圧特性が大きく変化することがわかった。

森田ら⁹⁾は、境界層における疎密波の反射屈折が物性のインピーダンス比で評価できることを利用して、地盤中へ

* 防衛大学校名誉教授

** 日本大学総合科学研究所

*** 日本大学理工学部海洋建築工学科

**** 西松建設(株)技術研究所

***** (株)CRC（研究当時日本大学大学院）

の疎密波エネルギーの伝達を考慮した境界条件を満足するグリーン関数を誘導している。しかし、物性値から算定されるインピーダンス比は、疎密波の反射特性しか考慮していないため、地盤内に吸収される横波（S波）並びに表面波の影響を考慮していない⁷⁾。

本報告では、海底地盤の影響を簡易的に考慮して、3次元領域における浮体式構造物の地震による応答特性を検討することを目的とする。このため、海底地盤における疎密波エネルギーの反射特性をインピーダンス比により考慮する方法を定式化する（便宜上、インピーダンス法と称す）と共に、インピーダンス法によって算定された流体力特性を弾性地盤法並びに水槽実験と比較検討することにより、最適なインピーダンス比の評価方法を検討した。さらに、得られた海底地盤の疎密波反射特性を考慮して、浮体式構造物の地震に伴う応答特性を紹介する。

2. 理論計算

2.1 水中および地盤の境界条件と基礎方程式^{9), 10)}

流体は非粘性でかつその運動は非回転であるとし、圧縮性を考慮する。基本座標系は、Fig.1に示すように水深 h の静水面上に x 軸および y 軸、鉛直下向きに z 軸を定義する。但し、 S_F は自由表面、 S_B は水底面、 S_H は浮体表面、 S_∞ は遠方での放射条件を満たす境界を表す。また、 n は境界上に立てた流体中に向かう単位法線ベクトルを示している。このときの流体運動を周波数領域で表示すると、入射波ポテンシャル ϕ_I 、ディフラクションポテンシャル ϕ_D 、ラディエーションポテンシャル ϕ_R に関する境界条件は、水底面が上下方向に変位振幅 a で周期運動するものとして以下のように表示できる。

$$\nabla^2 \phi_i + K^2 \phi_i = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (i = I, D, R_j) \quad (1)$$

$$\phi_i = 0 \quad \text{on } S_F \quad (i = I, D, R_j) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_{R_j}}{\partial n} = v_{R_j} = i\omega z \quad \text{on } S_H \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = v_i = i\omega a \quad \text{on } S_B \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + \frac{iK}{\beta} \phi_i = 0 \quad \text{on } S_B \quad (i = D, R_j) \quad (6)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} - iK\phi_i \right) = 0 \quad \text{on } S_\infty \quad (i = I, D, R_j) \quad (7)$$

ただし、 $K(=\omega/C)$ は波数を、 C は水中音速を示している。

また、流体中と海底面における進行波と反射波の海底面での接続条件である式(6)の左辺第2項中 β は、流体と海底面の音響インピーダンス比率であり、水中疎密波の海底

面での反射、透過の程度を表している。 β の値は、地盤条件により式(8)を用いることで表示され、透過係数 A_T および反射係数 A_R は式(9)のように表示できる。すなわち、インピーダンス比 β の値を無限大とすると海底面での完全反射を想定したものとなる。

$$\beta = \frac{\rho_s V_p}{\rho C} \quad (8)$$

$$A_T = \frac{2}{\beta + 1}, A_R = \frac{\beta - 1}{\beta + 1} \quad (9)$$

ここで、 ρ_s は地盤密度 (kg/m^3)、 V_p は地盤内 P 波の速度 (m/s)、 ρ は流体密度 (kg/m^3)、 C は水中音速 (m/s) である。

Fig.1 Coordinate system

2.2 グリーン関数およびその計算方法

物体表面および地盤面以外の境界条件を満足するグリーン関数 $S(P, Q)$ は、観測点 $P(x, y, z)$ および特異点 $Q(\xi, \eta, \zeta)$ を用い、無限鏡像の関係を用いて式(10)と表示出来る。¹⁰⁾

$$S(P, Q) = -\frac{1}{4\pi} \left[\frac{e^{-iKR}}{R} - \frac{e^{-iKR_0}}{R_0} + \sum_{n=1}^{\infty} (-)^n \left\{ \frac{e^{-iKR_n}}{R_n} - \frac{e^{-iKR_{n0}}}{R_{n0}} + \frac{e^{-iKR_{nm}}}{R_{nm}} - \frac{e^{-iKR_{n\infty}}}{R_{n\infty}} \right\} \right] \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} \\ R_0 &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2} \\ R_n &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta+2nh)^2} \\ R_{n0} &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta-2nh)^2} \\ R_{nm} &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta-2nh)^2} \\ R_{n\infty} &= \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta+2nh)^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

また、式(10)は式(12)に示す λ_n を用いて式(13)のように書き直すことが可能である。

$$\lambda_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{h} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (12)$$

$$S(P, Q) = \begin{cases} \frac{i}{2h} \sum_{n=0}^{\infty} \sin \lambda_n z \sin \lambda_n \zeta H_0^{(2)} \left(r \sqrt{K^2 - \lambda_n^2} \right) & K > \lambda_n \\ -\frac{1}{\pi h} \sum_{n=0}^{\infty} \sin \lambda_n z \sin \lambda_n \zeta K_0 \left(r \sqrt{\lambda_n^2 - K^2} \right) & \lambda_n < K \end{cases} \quad (13)$$

ここで、式(10)は特異点処理が容易であるものの収束が悪く、式(13)は特異点処理が困難であるものの収束が良い特性を有している。このため、観測点と特異点の距離によって両式を使い分けることとした。

2.3 湧き出し分布による積分方程式

グリーンの第2定理より、ディフラクション問題では式(14)が、ラディエーション問題では式(15)が成立する。

$$-\frac{1}{2}\phi_p(P) = \int_{s_s} \phi_p(Q) \frac{\partial}{\partial n} S(P, Q) dS(Q) + \int_{s_s} S(P, Q) \frac{\partial \phi_p(Q)}{\partial n} dS(Q) \quad (14)$$

$$-\frac{1}{2}\phi_q(P) = \int_{s_s} \phi_q(Q) \frac{\partial}{\partial n} S(P, Q) dS(Q) - \int_{s_s} S(P, Q) \frac{\partial \phi_q(Q)}{\partial n} dS(Q) + \int_{s_s} S(P, Q) \frac{\partial \phi_q(Q)}{\partial n} dS(Q) \quad (15)$$

さらに、入射波ポテンシャルは式(16)のように表示することができる⁶⁾⁹⁾。

$$\phi_i = \frac{i\omega a}{K} \frac{\beta \cos Kh}{\beta \cos Kh - i \sin Kh} \quad (16)$$

なお、浮体底部に作用する圧力 P は式(17)から、荷重 F_{Dj} は式(18)から、 i 方向振動に伴う j 方向ラディエーション流体力は式(19)より算定することが可能である。

$$P = -i\rho\omega(\phi_i + \phi_p)_{|s_s} \quad (17)$$

$$F_{Dj} = -i\rho\omega \int_{s_s} \{\phi_i(Q) + \phi_p(Q)\} n_j dS(Q) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F_{Rij} &= \rho\omega^2 \int_{s_s} \operatorname{Re}[\phi_{Ri}(Q)] n_j dS(Q) X_j \\ &\quad + \rho\omega^2 \int_{s_s} \operatorname{Im}[\phi_{Ri}(Q)] n_j dS(Q) X_j \\ &= M_{Rij} X_j + D_{Rij} X_j \end{aligned} \quad (19)$$

3. インピーダンス比の検討

3.1 2次元領域における弾性地盤法との比較

インピーダンス比 β の検討を行うため、各手法を用いて2次元領域におけるラディエーション流体力を算定した。

解析条件は、浮体幅 B を 1000m、水深 h を 20m として、浮体の吃水を考慮しない浅吃水理論により算定されている。また、地盤条件は、P 波の速度 $V_P=6650$ m/s、S 波の速度 $V_S=3450$ m/s、地盤密度 $\rho_s=2770$ kg/m³ の硬い岩盤を想定している。横軸に無次元波数 KB を、縦軸に浮体式構造物全体に作用する付加質量係数並びに減衰係数を Fig.2 に示す。

なお、弾性地盤法による解析結果を *Flexible bottom Method*、剛底法による解析結果を *Rigid bottom Method*、本手法による解析結果を *Imp. Method* と表示した。ただし、インピー

ダンス比 β は、解析に用いた地盤物性から算定すると、海底面での反射率が 0.84 程となる。このため、その結果を A_R084 と、インピーダンス比 β を地盤物性値から算定される反射率の 10%(0.08)とした結果を A_R008 と表記した。

計算結果より、反射率を 10%とした結果(A_R008)において、弾性地盤法と同様に浮体幅に依存する共振の影響が減少していることがわかる。また、10%という数値に関しては、地盤に吸収される全エネルギー量の 90%程度が横波および表面波として、10%程度が縦波(疎密波)として地盤内に伝播する¹¹⁾ことを踏まえると妥当な値と考えられる。なお、若干ではあるが共振が確認されるのは、インピーダンス法では地盤面全ての領域で均等かつ物性の異なる境界に直角に入射した場合の反射吸収特性を算定しているのに対し、弾性地盤法では地盤面に入射する疎密波特性並びにレイリー波の発生に伴う弾性地盤の変形によって、場所毎に反射吸収特性が異なるためである。

3.2 水槽実験との比較

本実験では、Fig.3の概念図に示すように、水深(h)1.12mの水底に設置された振動台を高周波数で振動させ、水面から 0.1m (Z_p) の振動台真上 (position-1) とそこから 1m 離れた地点 (position-2) での圧力を測定することにより水中での疎密波伝播特性を検討した。

実験結果並びに計算結果の比較を Fig.4 および Fig.5 に示す。縦軸は圧力 P (N/m²) を、流体密度 ρ (Kg/m³)、水中音速 C (m/s)、角速度 ω (rad/sec)、振動盤の変位 a (m) で無次元化した値であり、横軸は周波数 f (Hz) で表示した。なお、本実験では水槽の仮底(ベニヤ板)に振動盤を設置したため、インピーダンス比は 2.895 となり、水底面で反射率は 50%程となる。また、計算結果は比較のため、剛底法 (*Rigid bottom Method*) とインピーダンス比 β を初期値としてそのまま行った結果 (A_R050) と、2次元解析の知見から反射率を 10%として行った結果 (A_R005) を示す。なお、計算結果において確認されたピーク周波数での圧力分布を Fig.6, Fig.7 に示す。

Fig.4 および Fig.5 から、計算結果が実験値を再現するに至らないものの、本手法の計算結果では剛底法と比べピーク周波数帯が低周波側で確認された。また、インピーダンス比 β を初期値のまま採用した計算結果 (A_R050) と 10%として採用した計算結果 (A_R005) ではピーク周波数帯に違いが表れ、より実験値を再現する解析結果が得られた。さらに、Fig.6, Fig.7 の圧力分布の解析結果からも想定されることから、実験精度に関する問題も挙げられる。これより、浮体式構造物の応答を考える場合には、インピーダンス比を物性値から求める反射率の 10%と仮定することによって、地盤での疎密波反射特性を概算できることがわかった。

Fig.2 Added mass and radiation damping coefficients

Fig.3 Experimental model

Fig.4 Characteristic of Pressure at position-1

Fig.5 Characteristic of Pressure at position-2

Fig.6 Characteristic of Pressure Distribution (724Hz)

Fig.7 Characteristic of Pressure Distribution (2220Hz)

4. 浮体式構造物の海震による応答特性

4.1 流体力特性

$L=300\text{m} \times B=100\text{m} \times d=2\text{m}$ の浮体式構造物を想定し、水深 20m の硬い岩盤を想定した設置条件における海震荷重ならびに付加質量係数の解析結果を Fig.8 に示す。比較のため剛底法の解析結果を *Rigid bottom Method* と、本手法による解析結果を *Imp. Method* ($A_0 0.84$) として表記した。海震荷重並びに付加質量係数の解析結果より、剛底法で発生する浅海域に設置された浮体式構造物特有の共振現象の影響が本手法では確認されないことが読みとれる。この結果は 2 次元領域において弾性地盤法でも確認されている。これより、従来理論によって指摘されてきた浮体式構造物特有の共振現象は発生しないことがわかった。また、3 次元領域においても本手法のインピーダンス比 β を検討することにより海底面でのエネルギー吸収を考慮したより実現象に即した解析が可能であると共に本手法の有用性が確認された。

ついで、大水深海域への設置を想定した水深 200m での解析結果を Fig.9 に示す。解析結果より、共振周波数が有限値で確認され、低周波数側へ移項することが確認されたものの、水深に依存する共振が海底面でのエネルギー吸収を考慮しても発生することがわかった。

4.2 浮体式構造物の弾性変形を考慮した応答特性

Nagata ら¹²⁾の手法を用いて、モード解析法により浮体式構造物の弾性応答解析を実施した。解析に用いた浮体は 4.1 節と同様の $L=300\text{m} \times B=100\text{m} \times d=2\text{m}$ を想定し、単位幅剛性を $EI=5.0 \times 10^8 \text{ (Nm}^2/\text{m)}$ の一様断面および一様質量分

布とした。Fig.10 は水深 20m の、Fig.11 は水深 200m の浮体中心部での鉛直変位である。比較のため剛底法による解析結果を *Rigid bottom Method*、本手法における剛体を仮定した浮体式構造物の結果を *Imp. Method Rigid Model*、弾性変形を考慮した浮体式構造物の結果を *Imp. Method Elastic Model* として表記した。Fig.10 の水深 20m における剛底法の結果では、浮体幅の影響による共振周波数帯 ($KB=4$ 付近) に近づくと浮体の応答が大きくなっているが、地盤影響を考慮した本手法では、剛体を仮定した結果並びに弾性変形を考慮した結果共に概ね 1 を示している。これより、地盤の影響の有無にかかわらず、浮体構造物の応答は、ほぼ地盤振動の大きさに等しいことがわかる。

Fig.11 からは、地震荷重の算定でも確認された水深方向の共振周波数帯において、浮体式構造物の応答が大きくなる可能性があるものの、剛底法では算定出来ない共振周波数帯での応答特性を、地盤影響の考慮により有限値で算定できることも示した。また Fig.12, Fig.13 に Fig.10 での解析結果における浮体全体の応答特性を示した。これらより、加振周波数が高くなると複雑な変形を示しているが、鉛直方向のモードが卓越しているため浮体の応答は地盤の振動振幅に大きく依存している。

Fig.8 Characteristics of Hydrodynamic Forces (h=20m)

Fig.9 Characteristics of Hydrodynamic Forces (h=200m)

Fig.10 Characteristic of Sea Shock Response (h=20m)

Fig.11 Characteristic of Sea Shock Response (h=200m)

 Fig.12 Characteristic of Sea Shock Response
(h=20m, $KB=0.16$)

Fig.13 Characteristic of Sea Shock Response
($h=20\text{m}$, $KB=4.09$)

4.3 実地震波による応答特性

ここでは、実地震波を想定した解析から、実機規模での海震による基本的な応答特性について確認する。入力波形は神戸海洋気象台で観測された兵庫県南部地震 UD 成分を入力波形として、フーリエ変換によって時刻歴応答を算定した。Fig.16 に加速度、Fig.17 に変位の入力地震波形並びに解析結果を示す。

両図より、入力地震波以上の応答が浮体式構造物に発生していることが読みとれる。これより、浮体式構造物に海震が作用した場合には、構造物自体に大きな圧力が作用することは想定されないものの、高次の弾性振動モードが卓越し、海底の振動よりも大きな応答の発生が想定されることがわかった。

5. 結 言

本研究において得られた結論をまとめると、以下の通りである。

- (1) 浮体式構造物の海震による応答特性を検討する場合、境界面での反射特性を示すインピーダンス比 β を検討することにより、弾性地盤を考慮した方法と同等な評価が可能であることを示した。
- (2) 水槽実験から、各境界面上での反射特性を考慮することの重要性を指摘すると共に、水中の疎密波分布特性に及ぼす地盤影響の大きさを確認した。
- (3) 3次元解析から、海底面での反射特性を考慮することにより、浅海域に設置された大型浮体式構造物特

有の共振現象の存在がなくなることが確認された。

- (4) 浮体式構造物の弾性応答特性は、地盤表面の振動振幅及び地盤の物性に大きく影響され、海底地盤表面の振動と同等の応答に弾性振動の影響が重ねられた応答が発生し、海底面と自由表面の間で発生する水の固有値を示す周波数付近で大きな応答が発生する可能性があることがわかった。

Fig.16 Time history of Acceleration

Fig.17 Time history of displacement

参 考 文 献

- 1) 佐藤孫七：海震の話し，気象 12.2，1968
- 2) 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.
- 3) 例えば清川哲志：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.
- 4) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：超大型浮体式海洋構造物に作用する海震荷重算定における浅吃水理論の適用範囲について，日本造船学会論文集，第 185 号，pp.181-186, 1999.
- 5) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：超大型浮体式海洋構造物の海震に伴う応答解析手法に関する基礎的研究，日本造船学会論文集，第 186 号，pp.215-222, 1999.
- 6) 別所正利，前田久明，増田光一，高村浩彰：海震に伴う海底地盤の振動特性に関する基礎的研究，日本造船学会論文集，第 189 号，2001.

- 7) 別所正利, 前田久明, 増田光一, 高村浩彰; 浮体式構造物の高周波数振動による動水圧と海底地盤の弾性変形特性に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第189号, 2001.
 - 8) 別所正利, 前田久明, 増田光一, 高村浩彰; 地震波の地盤・水中伝播特性を考慮した海震に伴う浮体式構造物の応答推定法に関する研究, 日本造船学会論文集, 第190号, 2001.
 - 9) 森田知志, 中村孝幸: 大型弾性浮体式構造物の地震応答特性について, 海岸工学論文集第44巻, pp.1001~1005, 1997
 - 10) 高村浩彰, 増田光一, 前田久明, 別所正利: 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(第3報)-3次元影響について-, 海岸工学論文集第44巻, pp.1001~1005, 1997
 - 11) 岩崎敏男, 島津晃臣訳; 土と基礎の振動-地盤振動と基礎的知識-, 鹿島出版会, p449.1975.
 - 12) Shuichi Nagata, Hisafumi Yoshida, Takashi Fujita, and Hiroshi Isshiki : The Analysis of the Wave-induced Response of an Elastic Floating Structures, 18th International conference on offshore mechanics and engineering, 1997
-