

海震に伴う海底地盤の振動特性に関する基礎的研究

正員 別 所 正 利^{*}
正員 増 田 光 一^{***}

正員 前 田 久 明^{**}
正員 高 村 浩 彰^{****}

Fundamental Study on Elastic Vibration of Sea Bottom under Hydrodynamic Pressure due to Sea Shock

by Masatoshi Bessho, *Member* Hisaaki Maeda, *Member*
Koichi Masuda, *Member* Hiroaki Takamura, *Member*

Summary

The purpose of this study is to grasp a "sea shock" phenomenon considering seabed condition. Therefore we introduce Green function which is used for the calculation for the response of ground displacement caused by dynamic pressure and calculation methods of response of seabed displacement caused by hydrodynamic pressure due to sea shock. Furthermore, we introduce a incident wave potential of sea shock phenomenon considering reflection and refraction on seabed boundary.

The conclusions obtained by the present paper are that the calculation results of green function for elastic ground due to dynamic pressure is controlled rayleigh wave component. In addition, characteristics of seabed oscillation due to earthquake wave is changed substantially by the seabed.

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、浮体式海洋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、これまでに大規模な浮体式海洋構造物を対象として、数値計算によって海震の影響を検討してきた^{4),5)}。その結果、疎密波が進行波とならない低周波数帯にもかかわらず、浮体端部から放射される疎密波が干渉し、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が示された。これより、何らかの形で地盤内に疎密波のエネルギーが伝搬

すると考えられる。

森田ら⁶⁾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核関数を誘導している。この方法は、地盤表面の物性から地盤上における疎密波の反射率を既知とした解析であるために、水中音場の評価に限定すれば、効果的な手法と考えられる。また、肥後ら⁷⁾は、境界要素法を用いて堆積層の影響を調べており、海震荷重の共振周波数特性が変化することを示している。しかしながら、両手法共に、表面波の発生を伴った海底地盤の振動特性並びに地盤内に吸収される疎密波エネルギー全てを考慮しているものではない。

本報告では、「海震」現象の基本的性質を把握するために、海底地盤を半無限均質弾性体と仮定して、海震による動水圧が作用した場合の地盤状態を検討することを目的とする。このため、原子炉建て屋並びに群杭等の地震時挙動解析で実績を有する地表面での境界条件を満足した半無限均質弾性体のグリーン関数^{8),9)}の特性を紹介するとともに、海底地盤に動水圧が作用した場合の地盤内変位の算定方法について述べる。さらに、地震波が地盤・水中を伝播する現象を考慮した海震問題における入射波ポテンシャルを誘導し、その特性についても報告する。

* 防衛大学校名誉教授

** 東京大学大学院工学系研究科

*** 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

原稿受理 平成 13 年 1 月 10 日

春季講演会において講演 平成 13 年 5 月 17, 18 日

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

本報告は2次元問題を扱うものであり、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。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 軸を定義する。但し、 S_F は自由表面、 S_B は水底、 S_H は浮体表面、 S_∞ は無限遠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、速度ポテンシャル ϕ は(1)式の Helmholtz 方程式を支配方程式とし、(2)式に示す境界条件を満足するものとする。

$$\Delta\phi + K_A^2\phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 0 && \text{on } S_F \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial\phi}{\partial n} - iK_A\phi \right) &= 0 && \text{on } S_\infty \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、水底については後述するものとし、 $K_A (= \omega/C)$ は波数、 C は水中音速である。(2)式の境界条件において、浮体表面のおよび水底面での境界条件以外を満足するグリーン関数 $s(p, q)$ は、観測点 $p(x, y)$ および特異点 $q(\xi, \eta)$ を用いて(3)式のように表示される⁴⁾。

$$s(p, q) = -\frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \sin \left\{ \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi y}{h} \right\} \sin \left\{ \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi \eta}{h} \right\} \frac{e^{-q_n \frac{\pi}{h} |x - \xi|}}{q_n} \quad (3)$$

$$q_n = \begin{cases} \sqrt{\left(n + \frac{1}{2} \right)^2 - \left(\frac{Kh}{\pi} \right)^2} & \text{for } \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 > \left(\frac{Kh}{\pi} \right)^2 \\ i \sqrt{\left(\frac{Kh}{\pi} \right)^2 - \left(n + \frac{1}{2} \right)^2} & \text{for } \left(\frac{Kh}{\pi} \right)^2 > \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

地盤については、半無限均質弾性領域における弾性波動理論に従うものとする。ここで、水面上を原点 o とする固定座標系と共に、地盤内での方程式の定式化に用いる水底上を原点 o' とする局所座標系を定義する。ただし、 x 軸は固定座標系および局所座標系において同一であるため、以下の定式化ではすべて x で統一するものとする。地盤内での基礎方程式は以下のように示すことが可能である。

$$(\Delta + k^2)u_j + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\partial v}{\partial x_j} = 0, \quad j=1, 2 \quad (5)$$

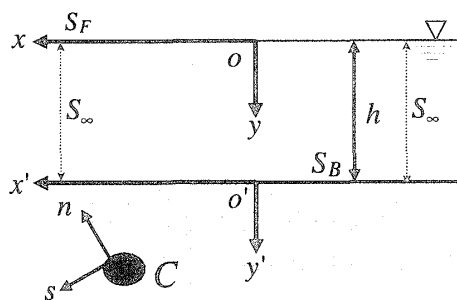


Fig.1 Coordinate system

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad k^2 = \frac{\rho_s \omega^2}{G}, \quad \nu = \frac{\sigma}{1-\sigma} \quad (6)$$

ただし、 γ_e は変位ポテンシャル、 ρ_s は地盤密度、 G はせん断弾性係数、 ω は円周波数、 σ はポアソン比とする。また、 $x_1 \equiv x, y_1 \equiv y, u_1 \equiv u$ は x 方向の、 $u_2 \equiv v$ は y 方向の変位と定義される。ここで、回転を表す変位ポテンシャル ω_e を導入すると、(7)式に示す Helmholtz 方程式を満足する。

$$\left. \begin{aligned} (\Delta + K^2)\gamma_e &= 0 \\ (\Delta + k^2)\omega_e &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$K^2 = \frac{1-\nu}{2} k^2 \quad (8)$$

ただし、 K は P 波の、 k は S 波の波数であり、 $K = \omega/V_p, k = \omega/V_s$ とし V_p, V_s は P 波、S 波の速度とする。この時変位成分は、(9)式と表示される。

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{1}{K^2} \frac{\partial \gamma_e}{\partial x} + \frac{1}{k^2} \frac{\partial \omega_e}{\partial y} \\ v &= -\frac{1}{K^2} \frac{\partial \gamma_e}{\partial y} - \frac{1}{k^2} \frac{\partial \omega_e}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

また、水底での境界に働く x および y 方向の境界力 t_1, t_2 は(10)式と表示できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{t_1}{G} &= \frac{2}{K^2} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \gamma_e + \left(1 + \frac{2}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \omega_e \\ \frac{t_2}{G} &= -\frac{k^2}{K^2} \left(1 + \frac{2}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \gamma_e + \frac{2}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \omega_e \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

水と地盤との境界 $y' = y - h = 0$ の上では y 方向変位が連続でなければならない。ただし、粘性を無視するので x 方向はスリップして良いものとする。

$$v = \frac{1}{i\omega} \frac{\partial}{\partial y} \phi, \quad \text{on } y' = 0 \quad (11)$$

また、境界力については、水平方向にせん断力が働かないことから、(12)式が成立する。

$$t_1 = 0, \quad \text{on } y' = 0 \quad (12)$$

さらに、鉛直方向では、水圧と等しいため、

$$t_2 = p = -i\rho\omega\phi, \quad \text{on } y' = 0 \quad (13)$$

なる条件がある。

水中のポテンシャルは、以下の積分方程式で与えられる。

$$\phi(x, y) = -i\omega \int_{-\infty}^{\infty} v(\xi, 0) s(x, y; \xi, h) d\xi \quad (y' = 0) \quad (14)$$

2.2 地盤表面の圧力による地盤内変位¹⁰⁾

2.1 節で定義した γ_e, ω_e は、それぞれヘルムホルツ方程式の解であるから地盤内 ($y' \geq 0$) で次のように表される。

$$\gamma_e(x, y') = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_e(\xi, 0) \frac{\partial}{\partial y} H_0^{(2)}(KR) \Big|_{\eta=0} d\xi \quad (15)$$

$$\omega_e(x, y') = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_e(\xi, 0) \frac{\partial}{\partial y} H_0^{(2)}(kR) \Big|_{\eta=0} d\xi \quad (16)$$

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y' - \eta)^2}, \quad R' = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y' + \eta)^2}$$

ここで、ハンケル関数のフーリエ変換は次式と表示される。

$$\frac{\partial}{\partial y} H_0^{(2)}\left(k\sqrt{(x - \xi)^2 + y'^2}\right) = \frac{1}{\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ip(x - \xi) - i\sqrt{k^2 - p^2} y'} dp \quad (17)$$

ただし、 $\sqrt{k^2 - p^2} \xrightarrow{|p| > k} -i\sqrt{p^2 - k^2}$ とする。つまり、

積分路は実軸の少し上にあるとする。これより、 γ_e, ω_e は以下のようにフーリエ変換することが可能である。

$$\gamma_e(x, y') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(p) e^{-ipx - i\sqrt{K^2 - p^2} y'} dp \quad (18)$$

$$\Gamma(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_e(x, 0) e^{ip\xi} d\xi \quad (19)$$

$$\omega_e(x, y') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(p) e^{-ipx - i\sqrt{k^2 - p^2} y'} dp \quad (20)$$

$$\Omega(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_e(x, 0) e^{ip\xi} d\xi \quad (21)$$

さらに、地盤表面の条件をフーリエ変換すると次の等式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{G} t_2(x, 0) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(p) e^{-ipx} dp \\ F(p) &= \frac{1}{G} \int_{-\infty}^{\infty} t_2(x, 0) e^{ipx} dx \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{2}{K^2} p \sqrt{K^2 - p^2} \Gamma(p) + \left(1 - \frac{2}{k^2} p^2\right) \Omega(p) &= 0 \\ -\frac{k^2}{K^2} \left(1 - \frac{2}{k^2} p^2\right) \Gamma(p) - \frac{2}{k^2} p \sqrt{k^2 - p^2} \Omega(p) &= F(p) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

これより、(19)式および(21)式は以下と再表示される。

$$\Gamma(p) = -\frac{K^2 \left(1 - 2\frac{p^2}{k^2}\right)}{k^2 \Delta(p)} F(p) \quad (24)$$

$$\Omega(p) = -\frac{2p \sqrt{K^2 - p^2}}{k^2 \Delta(p)} F(p) \quad (25)$$

$$\Delta(p) = \left(1 - \frac{2p^2}{k^2}\right)^2 + \frac{4p^2}{k^4} \sqrt{K^2 - p^2} \sqrt{k^2 - p^2} \quad (26)$$

(9)より水平・鉛直変位は(27)式および(28)式と表示できる。

$$u(x, y') = \frac{1}{2\pi i k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(1 - \frac{2p^2}{k^2}\right) e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} + \frac{2\sqrt{K^2 - p^2} \sqrt{k^2 - p^2}}{k^2} e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} \right\} \frac{e^{-ipx} p}{\Delta(p)} F(p) dp \quad (27)$$

$$v(x, y') = \frac{1}{2\pi i k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(1 - \frac{2p^2}{k^2}\right) e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} + \frac{2p^2}{k^2} e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} \right\} \frac{e^{-ipx} \sqrt{K^2 - p^2}}{\Delta(p)} F(p) dp \quad (28)$$

これらより、(29)式および(30)式に示すグリーン関数を定義すれば、地盤表面上の任意加振における水平・鉛直変位が(31)式および(32)式と表示することが可能である。

$$U(x, y'; \xi, 0) = \frac{1}{2\pi i k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(1 - \frac{2p^2}{k^2}\right) e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} + \frac{2\sqrt{K^2 - p^2} \sqrt{k^2 - p^2}}{k^2} e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} \right\} \frac{e^{-ip(x - \xi)} p}{\Delta(p)} dp \quad (29)$$

$$V(x, y'; \xi, 0) = \frac{1}{2\pi i k^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(1 - \frac{2p^2}{k^2}\right) e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} + \frac{2p^2 \sqrt{K^2 - p^2}}{k^2} e^{-i\sqrt{K^2 - p^2} y'} \right\} \frac{\sqrt{K^2 - p^2} e^{-ip|x - \xi|}}{\Delta(p)} dp \quad (30)$$

$$u(x, y') = \frac{1}{G} \int_{-\infty}^{\infty} t_2(\xi, 0) U(x, y'; \xi, 0) d\xi \quad (31)$$

$$v(x, y') = \frac{1}{G} \int_{-\infty}^{\infty} t_2(\xi, 0) V(x, y'; \xi, 0) d\xi \quad (32)$$

ここで、グリーン関数の積分路上に複数の特異点が存在するため、積分範囲を $0 < p < K$, $K < p < k$, $k < p$ における $p = K_R$ 並びに虚軸上の積分に分割して数値積分を行うこととする。ただし、 K_R は(26)式の根であり、レイリー波の波数である。

2.3 震源から地盤中を伝播した地震波の水中への伝搬¹¹⁾

地盤物性が均質で、震源が十分遠いと仮定すれば、地震波が平面波として海底地盤面に到達すると考えることがで

きる。このため、 $e^{iK(x \cos \alpha + y' \sin \alpha)}$ なる P 波が地盤表面に入射角 α で入射する場合には、地盤内には P 波の正反射分と角度 β をなして S 波が反射するため、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_e &= iK \left[e^{iK(x \cos \alpha + y' \sin \alpha)} + A_P e^{iK(x \cos \alpha - y' \sin \alpha)} \right] \\ \omega_e &= ikB_P e^{ik(x \cos \beta - y' \sin \beta)} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

ただし、 A_P は P 波の反射成分の、 B_P は S 波の反射成分の振幅を示している。また、Huygens の原理から導かれる波

動の反射・屈折の法則から(34)式が成立する。

$$K \cos \alpha = k \cos \beta \quad (34)$$

これらと2.1節より、以下の3式が導かれる。

$$v|_{y=0} = \sin \alpha (1 - A_P) e^{iKx \cos \alpha} + B_P \cos \beta e^{ikx \cos \beta} \quad (35)$$

$$\frac{t_1}{G} = -iK(1 - A_P) \sin 2\alpha e^{iKx \cos \alpha} - ikB_P \cos 2\beta e^{ikx \cos \beta} \quad (36)$$

$$\frac{t_2}{G} = ikB_P \sin 2\beta e^{ikx \cos \beta} + iK \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{k^2}{K^2} \right) (1 + A_P) e^{iKx \cos \alpha} \quad (37)$$

また、水底面での鉛直変位は、(38)式と表示することが可能である。

$$v|_{y=0} = B_P^* e^{iKx \cos \alpha} \quad (38)$$

$$B_P^* = (1 - A_P) \left[\sin \alpha - \frac{K \cos \beta \sin 2\alpha}{k \cos 2\beta} \right] \quad (39)$$

この水底面での鉛直変位 v による水中の圧力は、水底面が無限遠まで均一に振動する仮定より、(14)式を用いて(40)式と表示できる。

$$p(x) = -\rho \omega^2 B_P^* \frac{\tan \left\{ \sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha} h \right\}}{\sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha}} e^{iKx \cos \alpha} \quad (40)$$

ここで、水底面上で、水中の圧力 p と地盤の境界力 t_2 が等しいことから(41)式が成立する。

$$iKGA_P^* = -\rho \omega^2 B_P^* \frac{\tan \left\{ \sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha} h \right\}}{\sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha}} \quad (41)$$

$$A_P^* = \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{k^2}{K^2} \right) (1 + A_P) - \frac{\sin 2\alpha \sin 2\beta}{\cos 2\beta} (1 - A_P) \quad (42)$$

これらより、反射率 A_P が求められ、入射波ポテンシャルを以下のように表示することが可能となる。ただし、震源での変位振幅を a とする。

$$\begin{aligned} \phi_I(x, y) &= -\int_{-\infty}^{\infty} i\omega v|_{y=0} S(x, y; \xi, h) d\xi \\ &= \frac{i\omega a B_P^* e^{iKx \cos \alpha} \sin \left(y \sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha} \right)}{\sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha} \cos \left(h \sqrt{K_A^2 - K^2 \cos^2 \alpha} \right)} \end{aligned} \quad (43)$$

また、 $e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)}$ なる S 波が入射角 β で海底地盤表面に入射する場合についても同様に誘導することできる。結果のみ示すと、以下のとおりである。

$$v|_{y=0} = B_S^* e^{ikx \cos \beta} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} B_S &= \left[k \sin 2\beta + \left\{ k \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{k^2}{K^2} \right) \cos 2\beta \right\} / \sin 2\alpha \right. \\ &\quad \left. + \frac{\rho \omega^2 \tan \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta} h \left(\frac{k \cos 2\beta}{2K \cos \alpha} - \cos \beta \right)}{iG \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta}} \right] \\ &\quad \left[k \sin 2\beta - \left\{ k \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{k^2}{K^2} \right) \cos 2\beta \right\} / \sin 2\alpha \right. \\ &\quad \left. - \frac{\rho \omega^2 \tan \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta} h \left(\frac{k \cos 2\beta}{2K \cos \alpha} - \cos \beta \right)}{iG \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta}} \right] \end{aligned} \quad (45)$$

$$B_S^* = (1 + B_S) \left[-\frac{k \cos 2\beta}{2K \cos \alpha} + \cos \beta \right] \quad (46)$$

$$\phi_I(x, y) = \frac{i\omega a B_S^* e^{ikx \cos \beta} \sin \left(y \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta} \right)}{\sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta} \cos \left(h \sqrt{K_A^2 - k^2 \cos^2 \beta} \right)} \quad (47)$$

3. 数値計算結果および考察

3.1 点加振された地盤表面の変位特性

ここでは、グリーン関数の基本的な特性を示し、地盤の振動特性について確認する。解析に際し、地盤条件を P 波の速度 $V_P=6650\text{m/s}$ 、S 波の速度 $V_S=3450\text{m/s}$ 、密度 $\rho=2770\text{kg/m}^3$ と設定した。また、結果の整理に水深 $h=20\text{m}$ を用いた。なお、観測点 P とわき出し点 Q の関係は、Fig. 2 に示すように、わき出し点 Q を水底中心に設定し、距離 x 離れた水底上に観測点 P を移動させた。Fig. 3 に U 関数の、Fig. 4 に V 関数の算定結果を示す。縦軸にはグリーン関数の算定結果を、横軸には無次元波数 $K_A h$ およびわき出し点と観測点間の距離を水深で無次元化した値を採用して整理されている。なお、ここで示す縦軸は、水底中心 Q を単位振幅の圧力で点加振した場合の、地盤表面に設置された観測点 P 上の水平および鉛直変位を示すものと理解される。

水平変位の影響を表す Fig. 3 の結果から、無次元波数 $K_A h$ の増加に伴って進行波の波長が短くなり、遠方に行くに従って規則的な振動特性を示していることが読みとれる。また、鉛直変位の影響を表す Fig. 4 の結果からも、同様な特性が読みとれる。しかしながら、加振点近傍での特性が Fig. 3 と Fig. 4 で異なっていることもわかる。

地盤面での変位特性は、水平変位を示す U 関数の場合、S 波とレイリー波の成分によって決定されるのに対し、鉛直変位を示す V 関数の場合は、P 波、S 波、レイリー波および局部波の影響を含むために、加振点近傍でレイリー波

以外の成分が卓越したために、規則的な振動（レイリー波）の影響が小さくなっている。このように、地表面での振動特性は、レイリー波によってほぼ支配され、周波数が高いほど振動が大きいことがわかった。

3.2 地震波による海底地盤の振動特性

ここでは、1層の地盤中を平面波と仮定した地震波が水中へ伝わる過程について検討する。水深 h を 100m とし、地盤条件を硬い岩盤を想定した $V_p=6650\text{m/s}$, $V_s=3450\text{m/s}$, $\rho_s=2770\text{Kg/m}^3$ および軟らかい岩盤を想定した $V_p=3400\text{m/s}$, $V_s=2000\text{m/s}$, $\rho_s=2300\text{Kg/m}^3$ とした場合の、海底地盤表面の振動特性を Fig.5 から Fig.7 に示す。ここで、横軸には P 波または S 波の入射角並びに水深で無次元化された無次元波数 $K_A h$ を、縦軸には地盤表面での鉛直変位 v の絶対振幅を入射波振幅 a で無次元化した結果を用いて整理している。

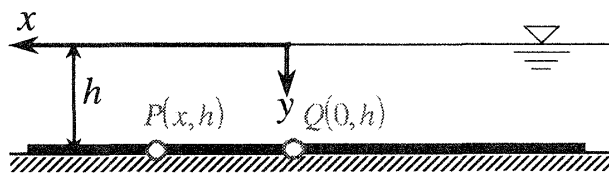
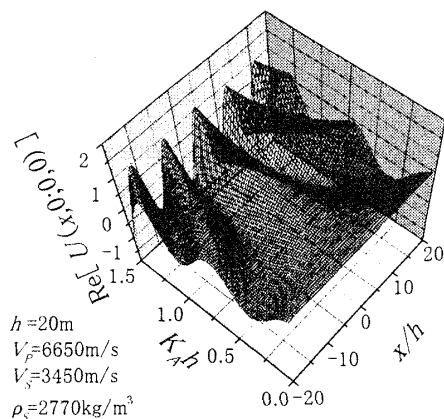
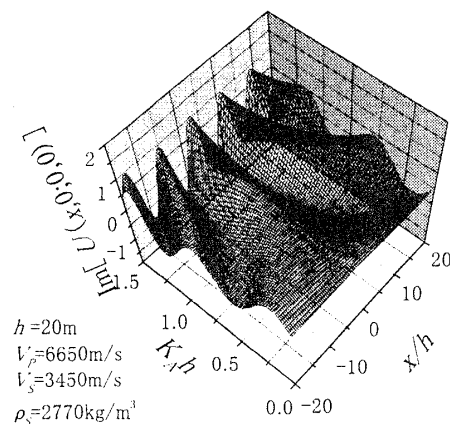


Fig.2 Conceptual Figure of This Analysis



(a) Real Part



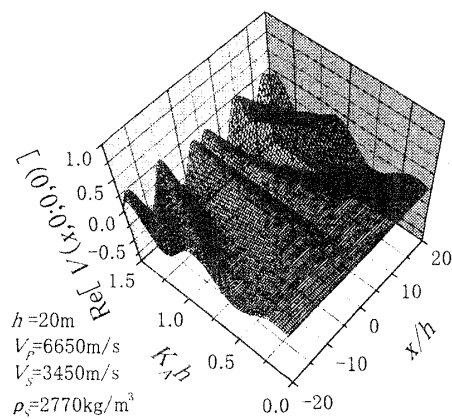
(b) Imaginary Part

Fig.3 Behavior of Green Function U

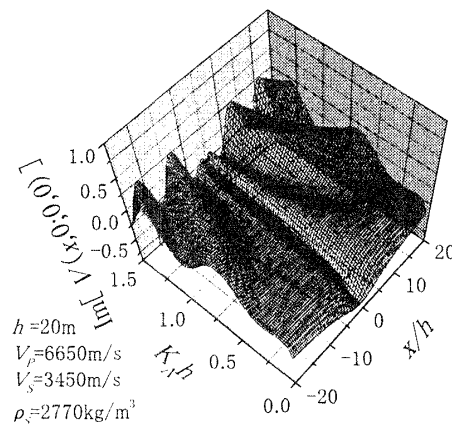
Fig.5 および Fig.6 から、地盤中を伝播した P 波は入射角 α が大きくなるに従って海底面の鉛直変位が大きくなり、直下型 ($\alpha=90\text{deg}$) で入射波振幅の 2 倍となることがわかる。これは、境界面を地表とおいた場合と同様の結果であり、S 波が現れないことに起因している。

また、入射波の振動が海底面に伝わらない周波数帯の存在も読みとれる。振動が伝播しない周波数帯の発生は水深に依存しており、Fig.7 に示す S 波の結果においても同様の周波数帯に存在している。この周波数は、水の固有値 $K_A h = (n - 1/2) \pi$, ($n=1, 2, \dots$) であり、海底地盤面と水面の間で疎密波が共振するために、海底地盤表面に大きな動水圧が作用し、振動振幅が小さくなったものと推察される。なお、Fig.5 および Fig.6 の比較から、地盤物性の相違による振動特性の変化が小さいことも読みとることができる。

Fig.7 に示す S 波では、振動が伝播する入射角が限定されており、直下型 ($\beta=90\text{deg}$) で S 波が水中に伝播しない現象を再現している。これは、式(34)に示した波動の反射・屈折の法則において、 α が $0 < \alpha \leq 90$ [deg] の関係を満足する β の場合だけ、水中に疎密波が透過されるためである。すなわち、P 波の波数 K および S 波の波数 k は地盤の物性によって異なるために、S 波が水中に疎密波となって伝播する入射角が地盤の物性に依存している。



(a) Real Part



(b) Imaginary Part

Fig.4 Behavior of Green Function V

4. 結 言

本報告では、海震問題において地盤特性を考慮するために、海底地盤に作用する動水圧に伴う地盤内変形の解析方法を示すと共に、海底地盤面での反射・屈折を考慮した海震問題の入射波ポテンシャルを誘導し、その特性について検討した。得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 地盤表面の加振に伴う地盤内変位を表すグリーン関数の算定から、地盤表面での変形特性は、レイリー波の影響が支配的であり、遠方にまで伝搬することがわかった。
- (2) 地盤を伝搬してきた地震波は、海底面での反射・屈折の特性によって地盤表面の振動特性が異なること、水底面と自由表面の間における水の固有周波数付近では、大きな動水圧が水中で発生するために、海底地盤の振動は小さくなることがわかった。

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) 森田和志，中村孝幸：大型弾性浮体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.
- 7) 肥後靖，石原大輔：地盤の変化が海震荷重に及ぼす影響に関する理論的研究，西部造船協会誌，第 229 号，pp.123-128, 1998.
- 8) 多治見宏：耐震理論に関する基礎的研究，東京大学生産技術研究所報告，第 8 巻第 4 号，pp.170-215, 1959.
- 9) 小堀鐸二，南井良一郎，鈴木有，日下部馨：長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その 1) — 半無限弾性地盤の場合 —，京都大学防災研究所年報，第 10 号 A，pp.283-314, 1967.
- 10) 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.
- 11) 宇津徳治：地震学，共立出版(株)，310p, 1977.

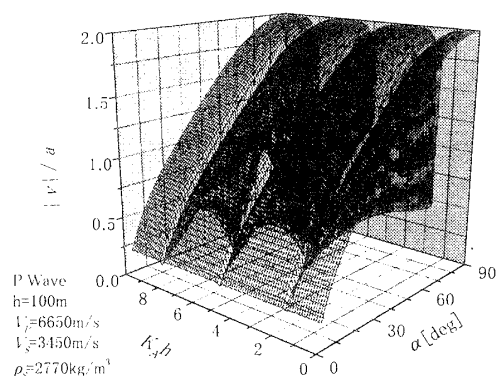


Fig.5 Characteristics of Seabed Displacement under Incident P Wave ($h=100\text{m}$, $V_p=6650\text{m/s}$, $V_s=3450\text{m/s}$)

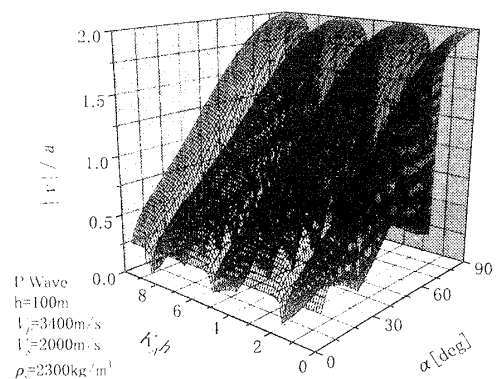


Fig.6 Characteristics of Seabed Displacement under Incident P Wave ($h=100\text{m}$, $V_p=3400\text{m/s}$, $V_s=2000\text{m/s}$)

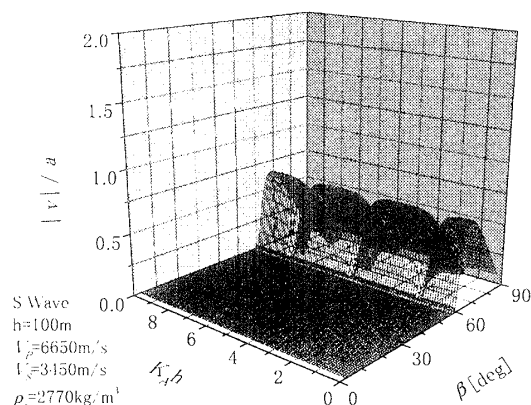


Fig.7 Characteristics of Seabed Displacement under Incident S Wave ($h=100\text{m}$, $V_p=6650\text{m/s}$, $V_s=3450\text{m/s}$)