

定常係留力を受けるアンカー周辺地盤の 周波数応答特性について

Frequency Response of Seabed around Anchor due to Steady-State Mooring Force

高谷富也*・前野賀彦**・高山知司***・平石哲也***

Tomiya, Takatani, Yoshihiko, Maeno,
Tomotsuka, Takayama and Tetsuya, Hiraishi

In the analysis of soil-structure interaction problems, the ground is typically modelled by either an elastic or a visco-elastic medium. It may be more suitable, however, to assume a fluid-filled porous material for seabed. The frequency response of seabed around an end bearing anchor due to steady-state mooring force is numerically evaluated by assuming the seabed as a fluid-saturated poroelastic half-space whose behavior is governed by Biot's theory, and depends on the permeability of seabed and the load carrying share of pore fluid to acting force. In this paper, these effects to frequency response of seabed are investigated through some numerical examples.

Keywords: End bearing anchor, Fluid-saturated poroelastic medium, Frequency response, Mooring force

1. はじめに

海岸構造物をより沖合いへと展開する場合の構造物の支持方式として考えられる浮体係留方式において、浮体を係留するための係留鎖や係留索および係留用アンカーの挙動は、波浪・流れ・風等の複雑な不規則作用を受け、浮体と海底地盤を含めた複雑な相互作用下にあることから、その解析は容易ではない。とくに、浮体係留用アンカーとその周辺地盤の連成系の動的相互作用効果を評価し、アンカーの変位応答やその周辺地盤の変位、応力および間隙水圧の応答特性に関する定性的な基礎資料を得ることは、係留用アンカーを有する浮体構造物の設計を行う上で極めて重要である。既に、筆者ら(1991)は浮体構造物の係留に対して有効であると考えられる支圧型アンカーを対象として、海底地盤モデルとして想定した土粒子骨格と間隙水の二相系から構成される多孔質飽和地盤に埋設されたアンカーが船舶係留外力を受ける場合のアンカーおよび周辺地盤のいくつかの地点での変位、応力および間隙水圧の応答特性に関する研究を行っている。また同時に、骨格と間隙水の相互作用を考慮したBiot(1956)の理論に基づいた応力-ひずみ関係および運動方程式より、液体の荷重分担率を考慮したアンカー周辺地盤の変位・応力解の誘導を行っている。

本研究は、この多孔質飽和弾性地盤に埋設された支圧型アースアンカーに定常的な係留外力が作用した場合のアンカー支圧板とその周辺地盤の連成系に対する動的相互作用解析を通じて、アンカーに作用する係留外力の加振振動数、アンカーの埋設深さ、地盤の透水係数および液体の荷重分担率などの違いがアンカー支圧板周辺地盤の変位、応力および間隙水圧の周波数応答にどのような影響を及ぼすかについて検討したもの

である。とくに、アンカー支圧板を含む鉛直面内における変位、応力および間隙水圧分布の周波数特性について調べた。

2. 解析方法

本研究では、海底地盤として空隙を有する弾性骨格と空隙を完全に満たす圧縮性の液体で構成されている多孔質飽和弾性体を想定し、アンカー支圧板をたわみ性円盤と仮定して、アンカーが定常的な係留加振力を受ける場合のアンカー支圧板およびその周辺地盤における変位、応力および間隙水圧の周波数応答を求

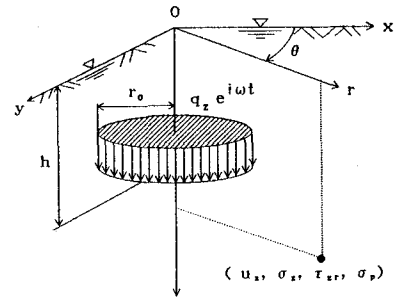


図-1 鉛直等分布加振力

める。この場合、図-1に示すように多孔質飽和弾性地盤内部の円形面上に作用する鉛直分布加振力による変位・応力解が必要となる。一般に、本研究において考えているような弾性骨格と液体の二層系地盤において鉛直方向に分布加振力が作用する場合、その加振力を骨格と液体が分担して受け持つと考えられる。いま、液体の荷重分担率を p とすれば、図-1に示す多孔質飽和弾性地盤内部の深さ $z=h$ における円形面上に等分布に作用する加振力による弾性地盤骨格の鉛直変位 u_z 、鉛直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{zr} および液体の応力 σ_p は、高谷ら(1991,1992)により次式のように求められている。

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校土木工学科(625 京都府舞鶴市白屋234番地)

** 正会員 日本大学短期大学部建設科土木コース

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部

$$u_z = -\frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} \int_0^\infty \frac{(1-p)U_1(\kappa) + pU_2(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} \cdot J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \quad (1)$$

$$\sigma_z = -\frac{Q_z}{2\pi r_0} \int_0^\infty \frac{(1-p)Z_1(\kappa) + pZ_2(\kappa)}{\Theta F(\kappa)} \cdot J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \quad (2)$$

$$\tau_{zr} = -\frac{Q_z}{2\pi r_0} \int_0^\infty \frac{(1-p)\kappa T_1(\kappa) - p\kappa T_2(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} \cdot J_1(\kappa r_0) J_1(\kappa r) d\kappa \quad (3)$$

$$\sigma_p = \frac{Q_z}{2\pi r_0} \int_0^\infty \frac{(1-p)P_1(\kappa) + pP_2(\kappa)}{\Theta F(\kappa)} \cdot J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \quad (4)$$

ここに、 Q_z は加振力の合力($=\pi r_0^2 q_z$)、 r_0 はアンカー支圧板の半径、 κ は波数、 μ は多孔質飽和弾性体のせん断弾性係数、 $J_0()$ 、 $J_1()$ はそれぞれ第0次および第1次のベッセル関数、 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ である。なお、 β_3 、 Θ 、 $F(\kappa)$ 、 $U_1(\kappa) \sim P_2(\kappa)$ の詳細については高谷ら(1991, 1992)の論文に譲る。

3. 数値計算結果とその考察

本研究では、Halpernら(1986)の論文で用いられている次の諸弾性定数、密度等の数値に対して、アンカー変位およびその周辺地盤における変位および応力の周波数応答の計算を行う。

$$\begin{aligned} \mu &= 98 \text{MPa}, \quad \lambda = 432 \text{MPa}, \quad Q = 280 \text{MPa}, \\ R &= 280 \text{MPa}, \quad \nu = 0.3 \text{ (ポアソン比)}, \\ f &= 0.48 \text{ (多孔質飽和弾性体の間隙率)}, \\ \rho_s &= 2.67 \text{ g/cm}^3 \text{ (弾性骨格の密度)}, \\ \rho_f &= 1.0 \text{ g/cm}^3 \text{ (液体の密度)} \end{aligned}$$

なお、 Q は弾性骨格と液体の体積変化の間に起こる相互作用に関する連成係数、 R は液体の圧縮剛性に関する係数である(Biot, 1956)。また、上記の ρ_s 、 ρ_f は素材としての密度であり、空隙を有する弾性骨格と空隙を満たす液体の有効密度 ρ_{11} 、 ρ_{22} および質量連成係数 ρ_{12} との関係は次式で表われる。

$$\rho_{11} + \rho_{12} = (1-f)\rho_s, \quad \rho_{12} + \rho_{22} = f\rho_f \quad (5)$$

ここで、 ρ_{12} は仮定の密度で、負の値をとるが、この ρ_{12} に関しては、Halpernら(1986)、小堀ら(1974)は、加振解の数値計算に当たって、 ρ_{12} に関する実用的なデータが得られていないことから、 $\rho_{12}=0$ と仮定している。そこで、本研究では $\rho_{12}=0$ とする。

次に、液体の粘性による減衰についてはBiot(1956)による運動方程式中に見られる減衰係数 b の代わりにダルシー則を用いて次式に示すような無次元化量に書き換えて、パラメータとして値を設定する。

$$\frac{b}{\omega\rho_s} = f^2 \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{1}{a_0 K_0} \quad (6)$$

ここに、 $a_0 (= \omega r_0 / V_s)$ は無次元加振振動数、 $K_0 (= k V_s / g r_0)$ は無次元透水係数、 k は透水係数、 g は重力の加速度、 ω は円振動数、 V_s は素材における横波の伝播速度である。また、本研究では無次元

透水係数 K_0 については、 $10 \sim 10^{-4}$ なる範囲の値を仮定する。なお、 K_0 の値が小さくなることは液体の粘性による減衰が大きくなることを意味する。

計算結果は、式(1)～(4)を次式に示すように無次元化し、変位および応力分布を無次元係数項の実部および虚部を用いて表示する。

$$u_z = \frac{q_z r_0}{2\mu} (V_1 + i V_2) \quad (7)$$

$$\sigma_z = q_z (S_1 + i S_2) \quad (8)$$

$$\tau_{zr} = q_z (T_1 + i T_2) \quad (9)$$

$$\sigma_p = q_z (P_1 + i P_2) \quad (10)$$

図-2 は、無次元加振振動数 $\omega r_0 / V_s = 0.1 \sim 2.5$ の範囲で、無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ について、多孔質飽和地盤の透水係数および液体の荷重分担率 p の違いが、アンカー支圧板の中央変位 u_z に及ぼす影響について調べたもので、アンカーの埋設深さ $H/r_0 = 10$ (H : アンカー支圧板の設置深さ)における中央変位の周波数応答を図示したものである。

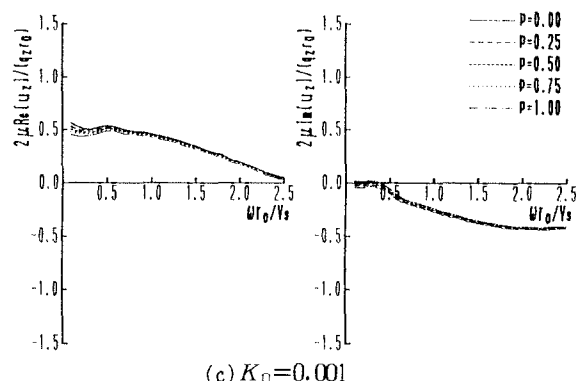
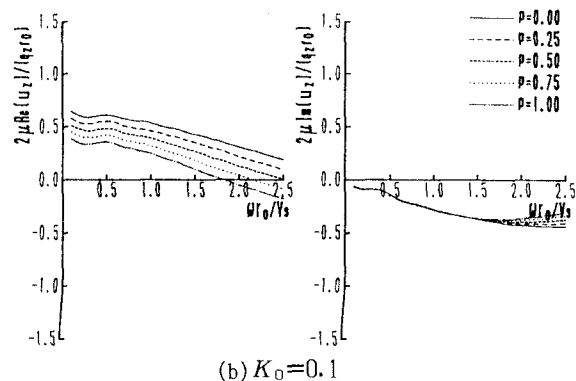
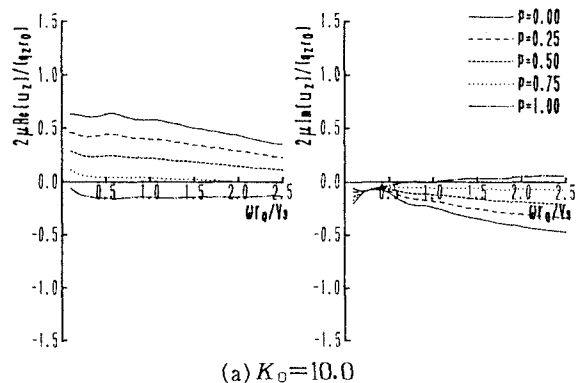


図-2 アンカー支圧板中央変位 u_z の周波数応答 ($H/r_0 = z/r_0 = 10$, $r/r_0 = 0$)

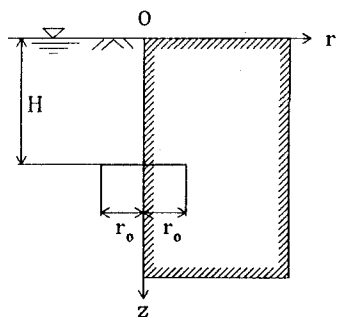


図-3 図示範囲

なお、埋設深さ $H/r_0 = 10$ の場合は、これ以上深くアンカーを埋設してもアンカー変位量の減少が期待できない一種の『限界深さ』に相当する(高谷ら、1990)。また、液体の荷重分担率 $p = 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の5つの場合とし、図中に見られる $Re[]$ および $Im[]$ はそれぞれ実部および虚部を取ることを意味する。この図より、液体の粘性による減衰が小さい場合 ($K_0 = 10.0$) には液体の荷重分担率 p の違いによる影響が顕著であるが、液体の粘性による減衰が大きくなるにつれて、液体の荷重分担率 p によるアンカー変位への影響は小さくなっていることがわかる。なお、紙面の都合上ここには図示していないが、アンカー支圧板の埋設深さが浅い場合についても、液体の粘性による減衰および液体の荷重分担率の違いによるアンカー変位への影響は、図-2の場合と同様の傾向を示している。また、当然のことながら、アンカー埋設深さが浅い場合には、深い場合に比べてアンカー変位量は大きくなっており、間隙水の存在による影響がより顕著なものとなって現れている

が、アンカー埋設深さが深くなるにつれてその影響は小さくなっている(高谷ら、1990)。

図-3に示すようにアンカー支圧板を挟んで $10r_0 \times 10r_0$ の斜線部分の範囲について、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ 、液体の荷重分担率 $p = 0.0$ およびアンカーの埋設深さ $H/r_0 = 10$ の条件のもとでアンカー周辺地盤における鉛直変位分布を振動数毎に図示したものが図-4である。なお、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ の5つの場合とした。この

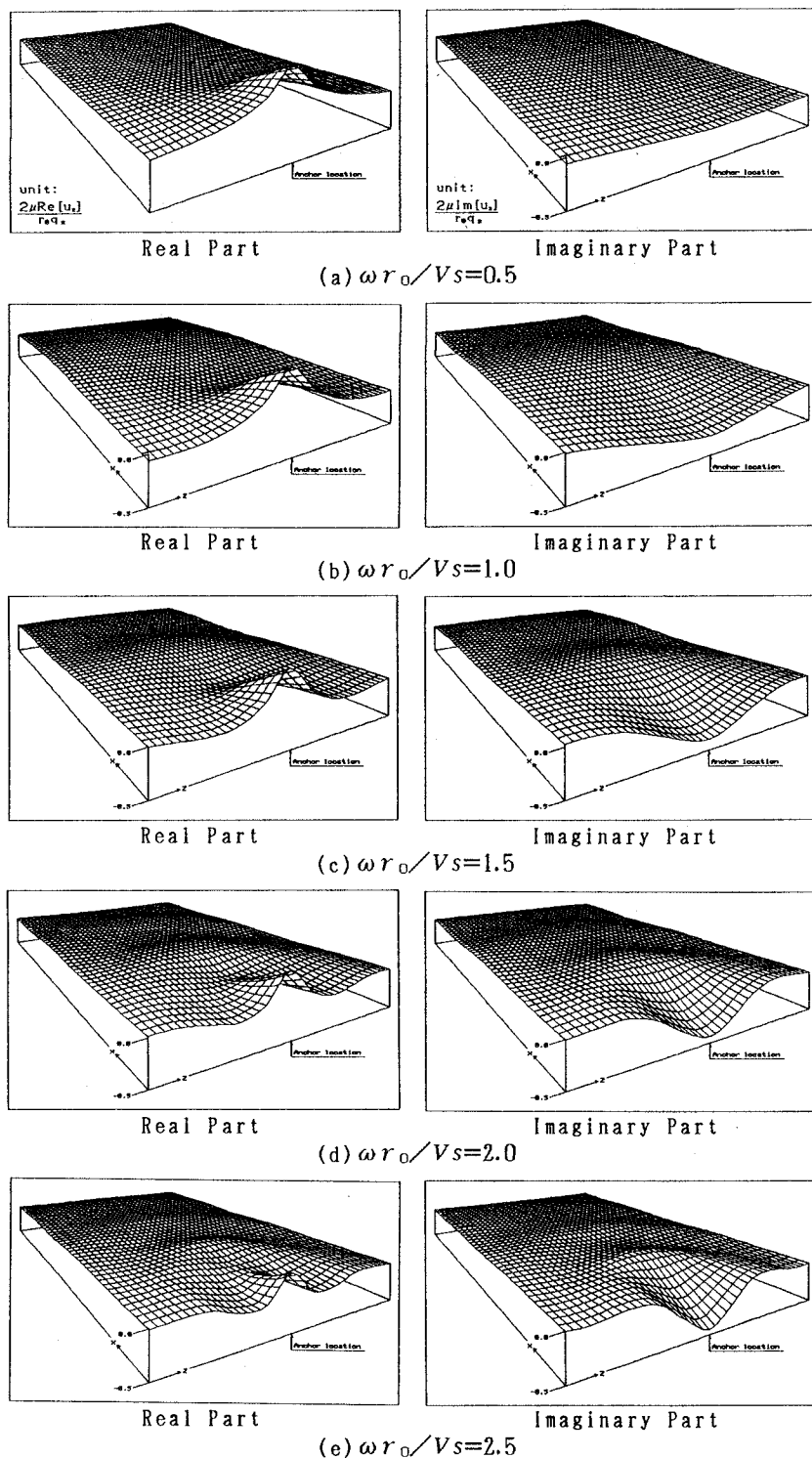


図-4 アンカー周辺地盤の変位分布
($K_0 = 0.1, p = 0.0, H/r_0 = 10, z/r_0 = x/r_0 = 0 \sim 10$)

図より、アンカー周辺地盤における加振振動数毎のアンカー支圧板からの波動の伝播状況がわかる。すなわち、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s$ が大きくなるにつれて、周辺地盤へと伝播する波動の波長が短くなっていることがわかる。また、図-2に示されているアンカー支圧板の中央変位 u_z の周波数応答からも明らかのように、アンカー周辺地盤における鉛直変位 u_z の実部は加振振動数が大きくなるにつれて小さくなっている。一方、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s$ が小さい場

合には、アンカー支圧板からの波動の逸散減衰に関する虚部は小さな値となっているが、加振振動数が大きくなるにつれてアンカー周辺地盤における変位の虚部の変動が顕著なものとなっていることがわかる。また、アンカーの埋設深さが『限界深さ』となる $H/r_0=10$ に位置しているために、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における地盤の変位の実部および虚部はともにほぼ同じ程度の値となっている。

一方、アンカー支圧板の周辺地盤における鉛直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{xz} および液体の応力 σ_p についても、図-2に示すような周波数応答を求め、液体の粘性による減衰および液体の荷重分担率の違いによる各応力への影響を詳細に検討した結果、アンカー周辺地盤における鉛直変位 u_z の周波数応答において見られたように、鉛直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{xz} および液体の応力 σ_p についても無次元透水係数 K_0 が大きい場合には、液体の荷重分担率 p の違いによる各応力への影響は顕著なものとなるが、 K_0 が小さくなるにつれてその影響は小さくなり、無次元透水係数 $K_0=0.001$ の場合には液体の荷重分担率 p による各応力への影響はほとんどないことがわかっている(高谷、1992)。

図-5は、アンカーの埋設深さが『限界深さ』となる $H/r_0=10$ のアンカー支圧板の周辺地盤における鉛直応力 σ_z の分布を無次元加振振動数毎に図示したものである。なお、無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、液体の荷重分担率 $p=0.0$ としている。この図より、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s$ に関係なくアンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における鉛直応力 σ_z の値は実部および虚部ともに逆符号でほぼ同じ程度の値となっていることがわかる。また、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s$ が大きくなるにつれて、鉛直応力の実部の変動に比べて虚部の変動が顕著なものとなっている。これは、無次元加振振動数 $\omega r_0/V_s$ が大きくなるにつれて波動の逸散減衰が大きくなるこ

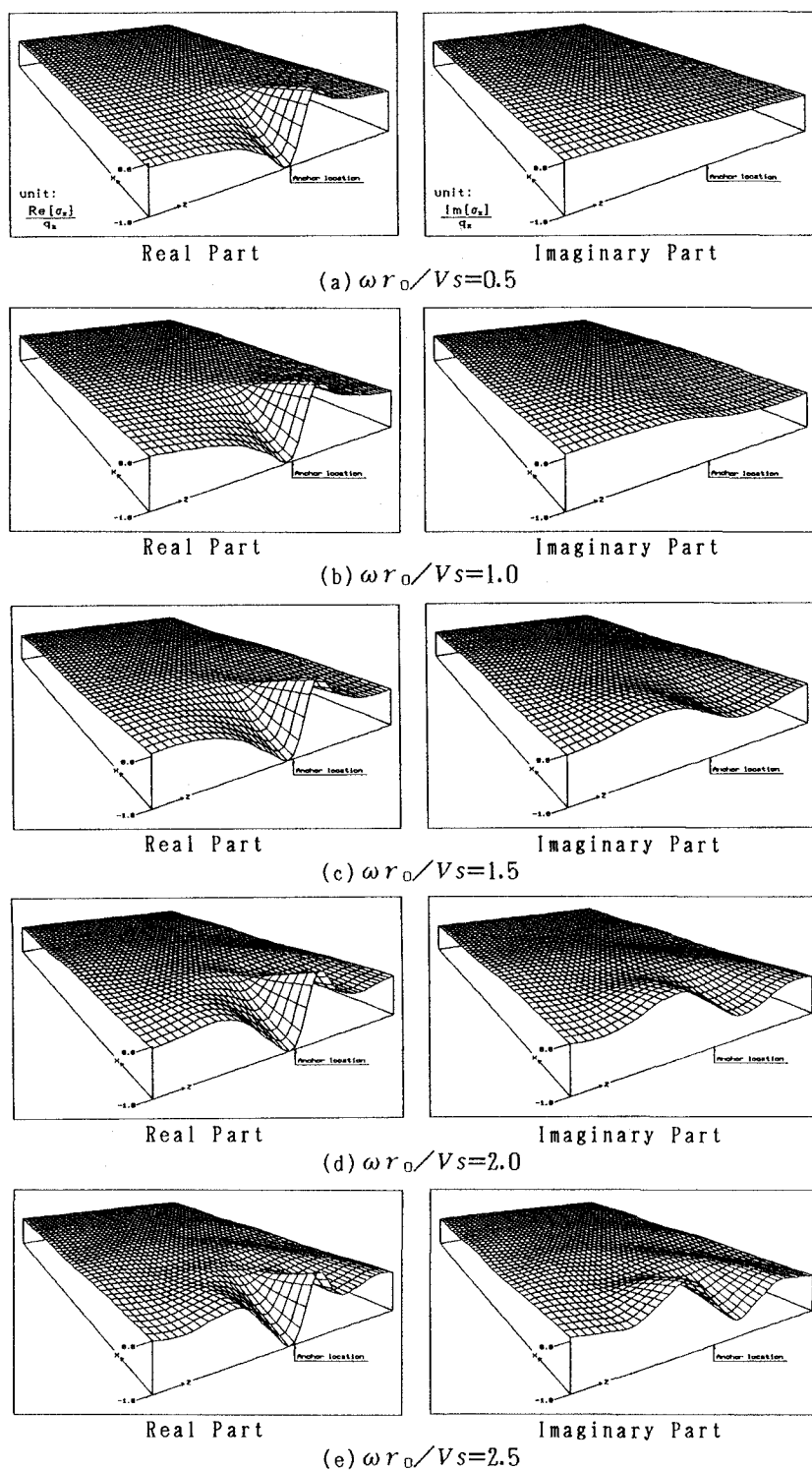


図-5 アンカー支圧板周辺の鉛直応力分布
($K_0=0.1$, $p=0.0$, $H/r_0=10$, $z/r_0=x/r_0=0\sim10$)

とによるものと考えられる。なお、ここには図示していないが、アンカー周辺地盤におけるせん断応力 τ_{xz} の分布についても同様の傾向が見られる。

一方、図-6、7はアンカーの埋設深さが『限界深さ』となる深さ $H/r_0=10$ のアンカー周辺地盤における液体の応力 σ_p の分布、すなわち間隙水圧分布を無次元加振振動数毎に図示したものであり、それぞれ無次元透水係数 $K_0=10.0$ および 0.001 に対するもので、液体の荷重分担率は $p=0.0$ としている。これらの図

より明らかなように、図-5に示す鉛直応力分布の場合と同様にアンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における間隙水圧の値は逆符号でほぼ同じ程度の値となっていることがわかる。また、図-6に示されている無次元透水係数 $K_0=10.0$ の場合における間隙水圧の実部に比べて、図-7に示す $K_0=0.001$ の場合には、アンカー支圧板周辺のみにおける変動が顕著なものとなって現れており、アンカー周辺地盤への波動の伝播は見られない。一方、間隙水圧の虚部については、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれてアンカー支圧板の周辺地盤には顕著な変動が現れていないことがわかる。これは、無次元透水係数 K_0 が小さくなることは液体の粘性による減衰が大きくなることを意味しており、これにより地盤骨格と液体との相対運動が小さくなり、両者がほぼ同じ振幅、同じ位相で運動することによるものと考えられる。したがって、アンカー周辺地盤における間隙水圧分布は、液体の粘性による減衰が大きい場合に比べて小さい場合には顕著なものとなることがわかった。

4. あとがき

本研究は、海底地盤を多孔質飽和弾性体と仮定し、この多孔質飽和弾性体地盤に埋設された支圧型アースアンカーに定常的な係留外力が作用した場合のアンカー支圧板とその周辺地盤の連成系に対する動的相互作用解析を通じて、アンカー支圧板に作用する係留外力の加振振動数、アンカーの埋設深さ、地盤の透水係数および液体の荷重分担率などの違いがアンカー支圧板周辺地盤の変位、応力および間隙水圧の周波数応答に及ぼす影響について調べた。その結果、本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

- 1) アンカー支圧板の埋設深さが浅い場合には、地盤の透水係数の違いによるアンカー周辺地盤の変位、応力および間隙水圧への影響は顕著なものとなって現れるが、埋設深さが深くなるにつれてその影

響は小さくなる。

- 2) 地盤の透水係数が高い場合には、液体の荷重分担率によるアンカー周辺地盤の変位、応力および間隙水圧への影響は顕著であるが、透水係数が小さくなればその影響は小さくなる。
- 3) アンカーに作用する係留外力の振動数の違いによるアンカー周辺地盤の間隙水圧応答への影響は地盤の透水係数が小さい場合に比べて大きい場合には顕著なものとなる。

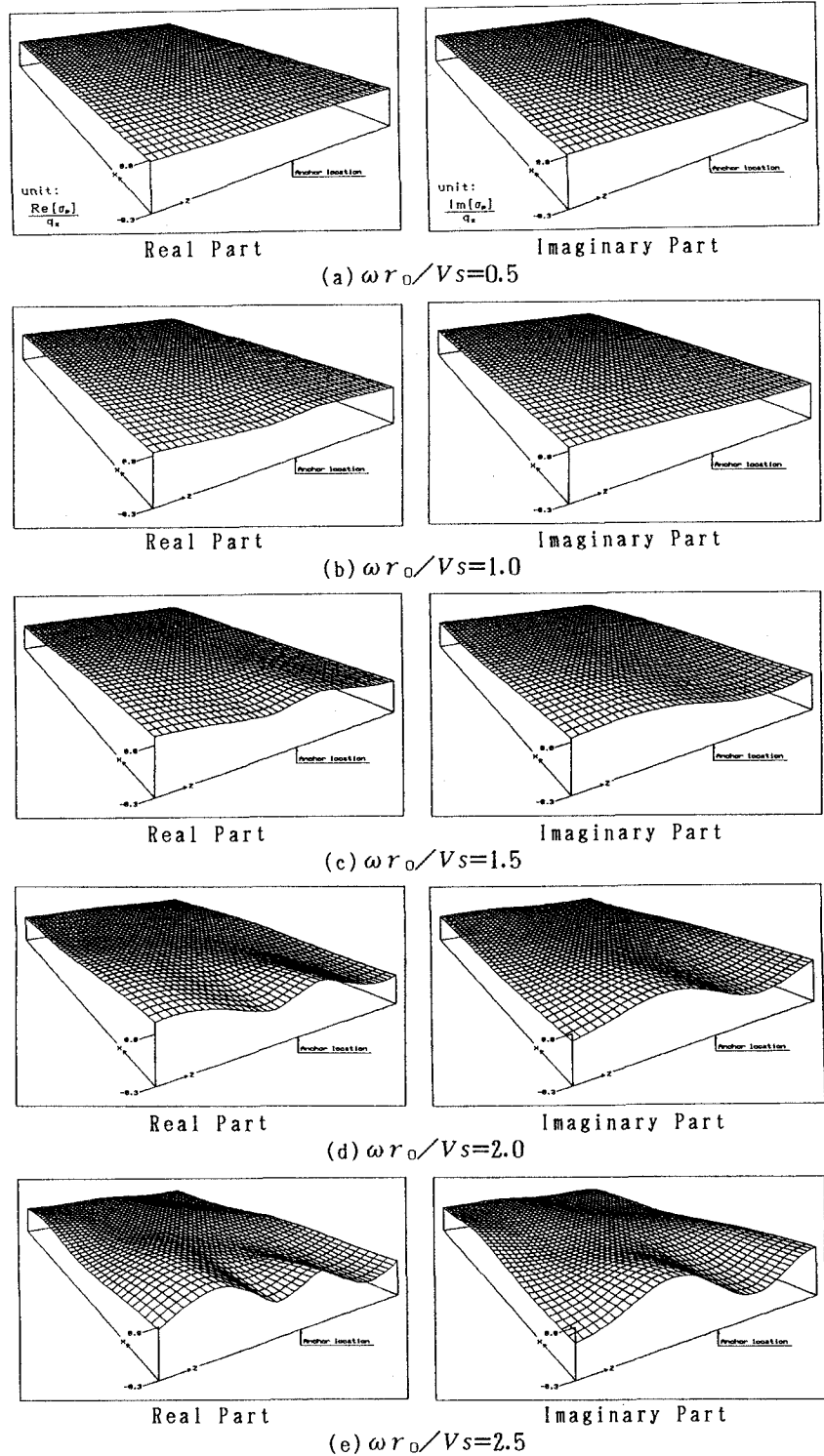


図-6 アンカー支圧板周辺の間隙水圧分布
($K_0=10.0$, $p=0.0$, $H/r_0=10$, $z/r_0=x/r_0=0\sim10$)

ところで、本研究では、アンカー支圧板に作用する係留外力を弾性骨格と液体が分担して受け持つと仮定し、液体の荷重分担率 p を考慮した多孔質飽和弾性地盤における変位・応力解を用いてアンカー支圧板の周辺地盤における変位、応力分布および間隙水圧分布の周波数応答を調べたが、たとえば、小堀ら(1974、1976)は、地表面全域において深さ方向の液体の応力勾配を零とする条件のもとで骨格と液体との分担率を調べている。しかし、液体の荷重分担率はアンカーの支圧板面内における液体の流出に対する適切な拘束条件のもとで決定される性質のものであろう。また、Halpernら(1986)は、矩形剛板の接触圧を求める解析過程において、矩形面内の骨格と液体の変位を同変位としているが、このような混合境界条件のもとで分担率が評価できるものと考えられる。今後、このような混合境界条件下でのアンカー支圧板とその周辺地盤系の動的相互作用解析を通じて、アンカー支圧板の変位およびその周辺地盤における変位、応力および間隙水圧分布の応答特性を調べる必要がある。

参考文献

- 小堀鐸二・立川 剛(1974)：飽和砂質地盤への複合体理論の定式化について、日本建築学会論文報告集、第220号、pp. 47～53。
 小堀鐸二・立川 剛(1976)：飽和砂質地盤の動力学特性について(1)、日本建築学会論文報告集、第244号、pp. 13～20。
 高谷富也・北村泰寿(1990)：多孔質飽和弾性地盤におけるアースアンカーの動的挙動特性について、第8回日本地震工学シンポジウム講演論文集、pp. 1209～1214。
 高谷富也・前野賀彦・高山知司・平石哲也(1991)：定常風を受ける係留船舶の振れ回りによるアンカー周辺地盤の応答、海岸工学論文集、第38巻、pp. 736～740。
 高谷富也(1992)：半無限多孔質飽和弾性体内部の鉛直分布加振力による変位・応力解について、舞鶴工業高等専門学校紀要、第27号、pp. 65～78。

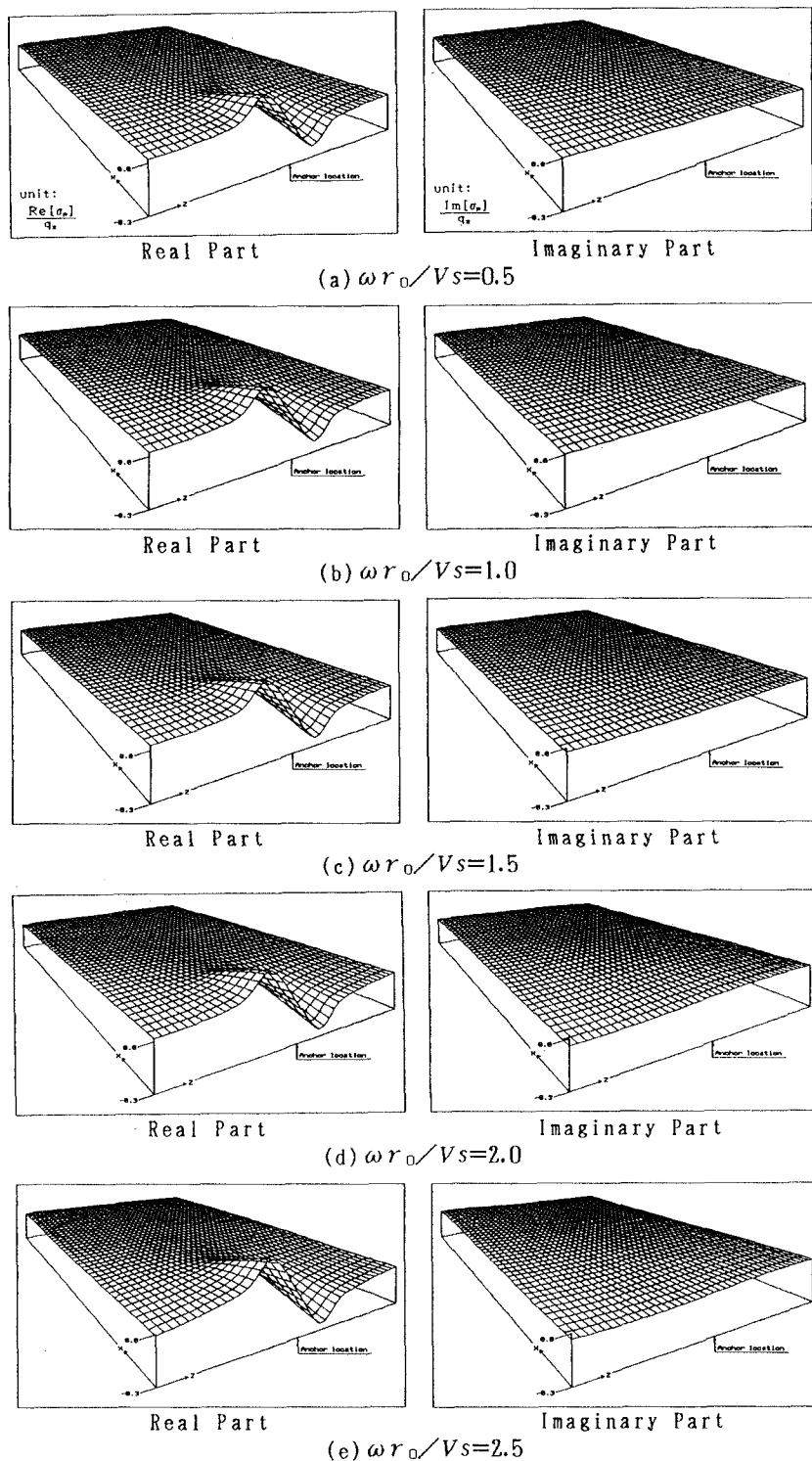


図-7 アンカー支圧板周辺の間隙水圧分布
 ($K_0=0.001$, $p=0.0$, $H/r_0=10$, $z/r_0=x/r_0=0\sim10$)

- Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 168～178.
 Halpern, M. R. and P. Christiano (1986): Response of poroelastic half-space to steady-state harmonic surface tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 609～632.