

摩擦型アンカー周辺地盤の応答特性

Dynamic Response of Seabed around Friction Anchor

高谷 富也*, 前野 賀彦**, 平石 哲也***, 高山 知司****

Tomiya Takatani, Yoshi-hiko Maeno, Tetsuya Hiraishi
and Tomotsuka Takayama

An advanced analytical procedure for a friction anchor-seabed interaction problem was developed to numerically evaluate the dynamic response of seabed around a friction anchor with an end bearing anchor due to mooring force of floating structure. The friction anchor and the end bearing anchor plate were assumed to be an elastic rod and a flexible circular plate, respectively. The seabed is assumed to be a fluid-saturated poroelastic medium whose behavior is governed by Biot's theory or wave propagation. The effect of the permeability of seabed on the response of seabed around friction anchor was numerically investigated.

Key words : Anchor-seabed interaction, Friction anchor, End bearing anchor, mooring system

1. はじめに

海岸構造物の設置水域の多様化に伴い、その構造形式として浮体構造が選択されることが多くなると考えられる。一般的には設置水深が大きくなるに従い、浮体形式の有利性が増すとされているが、浅海においても厚い軟弱層上では信頼性の高い係留法が伴えば有力な構造形式である。つまり、海象・気象条件に関係なくドックでの組立が可能であること、現地曳航が容易であること、係留法にもよるが現地での施工期間が短縮されることなどが考えられる。以上のことから、軟弱地盤上における係留システムの検討が重要と考えられる。浮体構造物の規模や海象・地盤条件に相応した係留システムの選択が必要とされることから、各種係留形式の特質について検討を行うことは有意義である。この点に関して、高谷ら(1991、1992・a)は支圧型アンカーの軟弱地盤への適用性を検討している。これに関連して、緊張係留方式の採用による衝撃張力の緩和効果を検証し(高谷ら、1992・b)、多点係留下のアンカーの応答特性についても検討している(前野ら、1993)。以上の研究から、支圧型アンカーの軟弱地盤への適用可能性が示唆されたが、その施工法が問題点として指摘された。そこで、大気圧を把持力として取り込むサクションアンカーの軟弱地盤への適用性を検討した(前野ら、1993; 高谷ら、1994)。

本研究では、一連の軟弱地盤への各種アンカーの適用性に関する研究の成果を踏まえた上で、摩擦型アンカーの軟弱地盤への適用可能性を検討するため、高谷ら(1994)により求められた摩擦型アンカーの周波数応答を用いて、アンカー周辺地盤の応答特性を求めた。摩擦型アンカーの変位応答解析においては、アンカーロッド部分に作用する周面摩擦を考慮す

るために、アンカーロッド部分を単杭とし、単杭先端部に支圧板を有する摩擦型アンカーモデルを想定し、摩擦型アンカー周辺地盤の変位、応力および間隙水圧の周波数応答を求めた。海底地盤の透水係数、支圧板の半径に対するアンカーロッド径の比などが摩擦型アンカー周辺地盤の変位、応力および間隙水圧の応答特性にどのような影響を及ぼすかについて検討した。なお、海底地盤として、Biot(1956)により提案された地盤骨格と間隙水の二相系から構成される多孔質飽和弾性地盤を想定した。また、海底地盤条件としては、飽和砂質土に対する諸弾性係数および密度等の数値(Halpern・Christiano, 1986)を用いて、海底地盤の透水係数が摩擦型アンカーの変位応答にどのような影響を及ぼすかについて調べた。

2. 摩擦型アンカーの応答特性について

本研究では、図-1に示すようなアンカーロッド部分の下端部に半径 r_0 の支圧板を有する摩擦型アンカーを想定し、摩擦型アンカーの先端部に周期的な引き揚げ加振力が作用した場合の摩擦型アンカー変位およびアンカー周辺地盤の

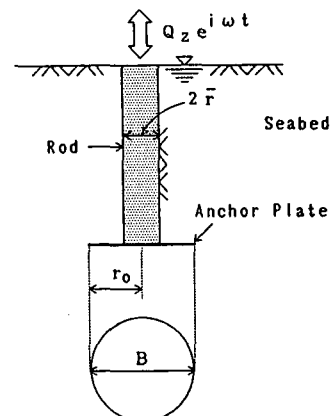


図-1 摩擦型アンカーのモデル

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科
(〒625 京都府舞鶴市白屋 234 番地)
** 正会員 日本大学短期大学部 建設学科
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室
**** 正会員 京都大学防災研究所

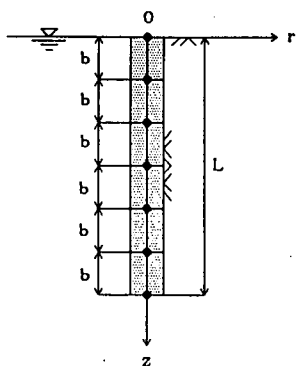


図-2 アンカーロード部分の分割モデル

応力や間隙水圧の応答特性を調べたものである。なお、図-1に示す摩擦型アンカーは、アンカーロード部分を弾性棒と仮定し、(弾性棒) + (支圧板) なるアンカーモデルとなっている。このアンカーモデルに対する変位の解析手法として

は、弾性棒の縦振動の運動方程式を図-2に示すような弾性棒の分割モデルに対して中央差分近似する。次いで、弾性棒の先頭部と下端部の境界条件および下端部にあるアンカー支圧板による地盤反力を考慮した運動方程式を誘導し、解くことにより、アンカーロード下端部に支圧板を有する摩擦型アンカーの変位応答を求めることができる。なお、これらの詳細については、高谷ら(1994)の論文に譲る。

一方、下端部に支圧板を有する摩擦型アンカー周辺地盤における変位・応力および間隙水圧については、サクシオンアンカー周辺地盤の変位・応力を求めた場合(高谷ら、1994)と同様に、アンカーロード部分に作用する周面摩擦力およびロッド下端部の支圧板による影響を重ね合わせることで、容易に変位・応力および間隙水圧の応答を得ることができる。

摩擦型アンカーの変位、アンカー周辺地盤の応力および間隙水圧の周波数応答解析について、アンカー支圧板の半径

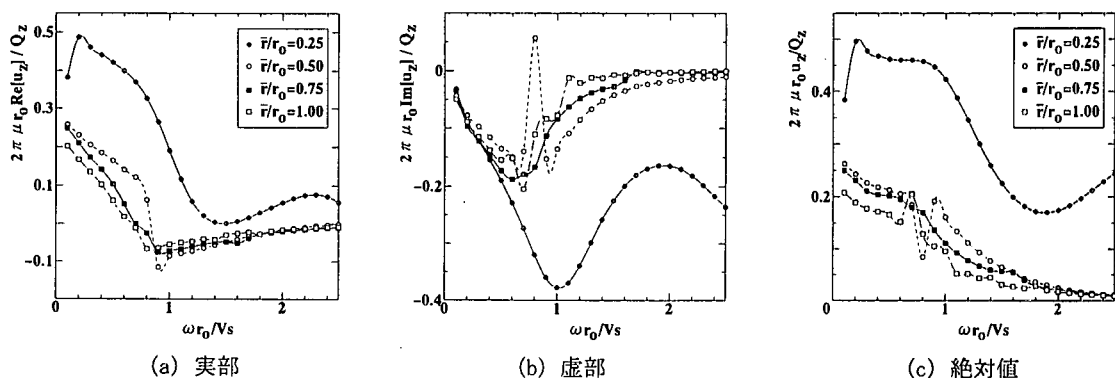


図-3 摩擦型アンカー変位の周波数応答 ($L/B = 5.0, K_0 = 10.0$)

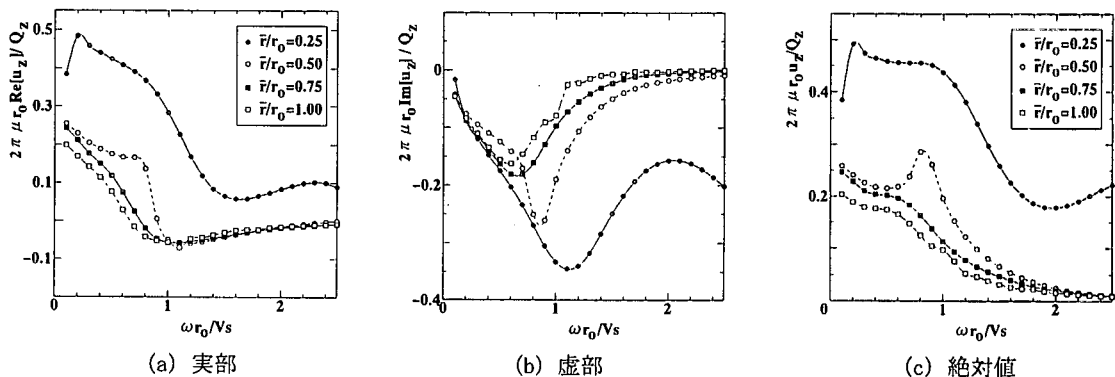


図-4 摩擦型アンカー変位の周波数応答 ($L/B = 5.0, K_0 = 0.1$)

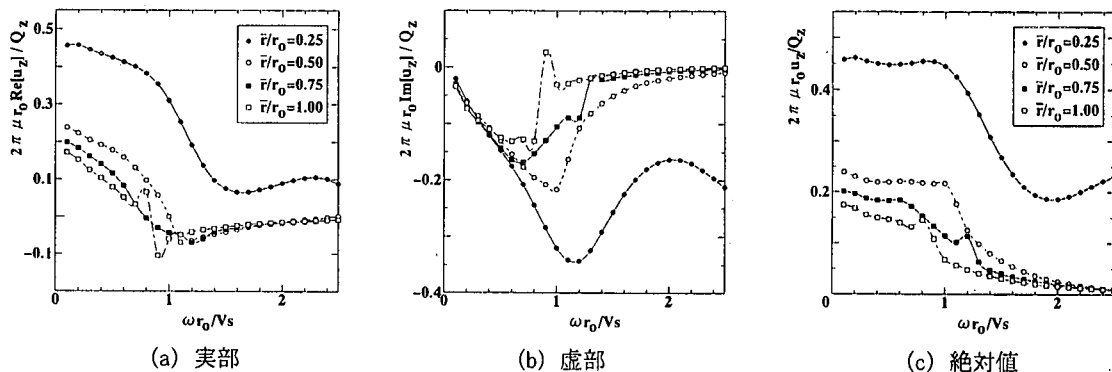


図-5 摩擦型アンカー変位の周波数応答 ($L/B = 5.0, K_0 = 0.001$)

r_0 に対するアンカーロッド半径 $\bar{r}$ の比 $\bar{r}/r_0$ 、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs$ ($=\omega r_0/Vs$) および無次元透水係数 K_0 ($=kVs/gr_0$) の2つのパラメータを用いてアンカー変位の応答特性を調べる。なお、上記の無次元パラメータ中に見られる r_0 は支圧板の半径、 k は地盤の透水係数、 g は重力加速度、 ω は円振動数、 Vs は素材における横波の伝播速度である。また、本研究では海底地盤の透水係数として $k=10^{-1} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ の範囲を考えているために、無次元透水係数 K_0 は $10 \sim 10^{-3}$ なる範囲の値を仮定する。なお、 K_0 が小さくなることは、間隙水の粘性による減衰が大きくなることを意味する。また、摩擦型アンカーの変位応答については、次式に示す無次元係数項の実部 f_1 、虚部 f_2 および絶対値 $\sqrt{f_1^2 + f_2^2}$ を用いて図示する。

$$u_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} (f_1 + if_2) = \frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} \sqrt{f_1^2 + f_2^2} e^{-i\phi_f} \quad (1)$$

ここに、 μ は多孔質飽和弾性地盤のせん断弾性係数、 ϕ_f は編角 ($=\tan^{-1}(f_2/f_1)$) である。

図-3～5は、摩擦型アンカーのロッド先端部の変位の周波数応答を無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合について、アンカー支圧板の半径 r_0 に対するアンカーロッド半径 $\bar{r}$ の比 $\bar{r}/r_0$ をパラメータにして図示したものである。なお、アンカーロッドの長さは $L/B = 5.0$ (B :アンカー支圧板の直径 $=2r_0$) で、アンカーロッド下端部の支圧板はたわみ性円盤としている。これらの図より、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、アンカー支圧板に対するアンカーロッド径の比 $\bar{r}/r_0$ が大きくなるにつれて、アンカーロッド部分に作用する周面摩擦抵抗が増大するために、アンカー変位は小さくなっている。また、支圧板に対するアンカーロッド径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.25$ の場合における摩擦型アンカー変位は他の $\bar{r}/r_0$ に比べてかなり大きな変位応答をすることがわかる。さらに、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれて、摩擦型アンカーの変位応答は小さくなっている。これは、 K_0 が小さくなることは、間隙水の粘性による減衰が大きくなり、地盤骨格と間隙水の相対運動が小さくなることを意味しており、両者はほぼ同じ運動をするものと考えられる。しかしながら、支圧板の半径に対するアンカーロッド半径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.25$ の場合に注目すると、無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1$ の2つの場合においては、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs$ が低い範囲では、 $K_0 = 0.001$ の場合より小さい変位応答を示している。つまり、逆に K_0 が大きい場合は小さな変位応答となっていることから、摩擦型アンカーに作用する加振外力が有する振動数特性によっては、アンカー変位に顕著な影響を及ぼす可能性があるので注意を要する。

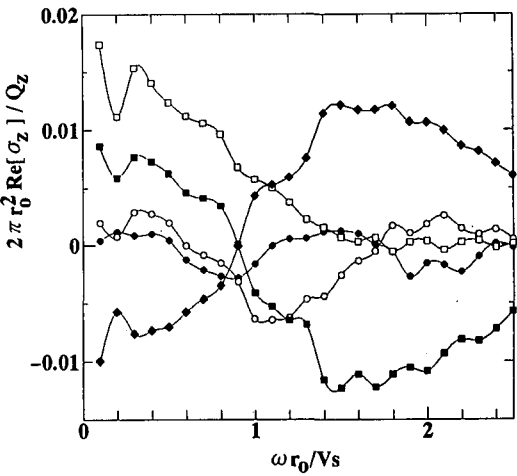
3. 摩擦型アンカー周辺地盤の応答特性について

本節では、摩擦型アンカーの変位応答解析を通じて得られ

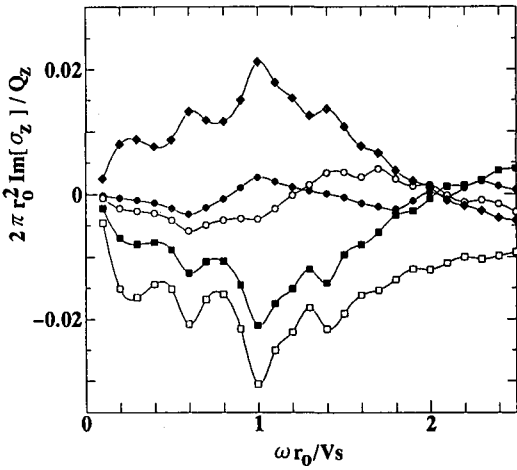
るアンカー周辺地盤の応力および間隙水圧の応答について調べる。なお、摩擦型アンカー周辺地盤の応力として、鉛直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{zr} および間隙水圧 σ_p を次式に示す無次元係数項の実部、虚部および絶対値を用いて示す。

$$\sigma_z = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} (z_1 + iz_2) = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} \sqrt{z_1^2 + z_2^2} e^{-i\phi_z} \quad \dots (2)$$

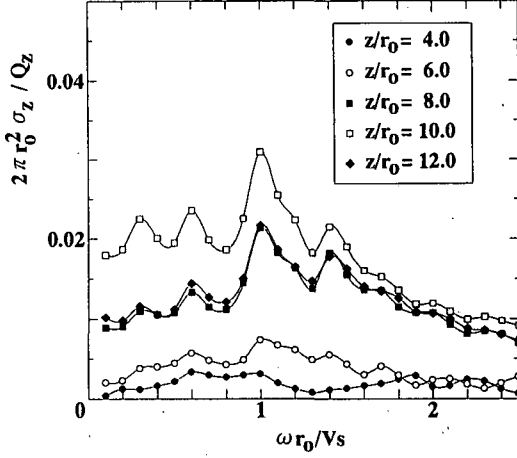
$$\tau_{zr} = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} (t_1 + it_2) = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} \sqrt{t_1^2 + t_2^2} e^{-i\phi_t} \quad \dots (3)$$



(a) 実部



(b) 虚部



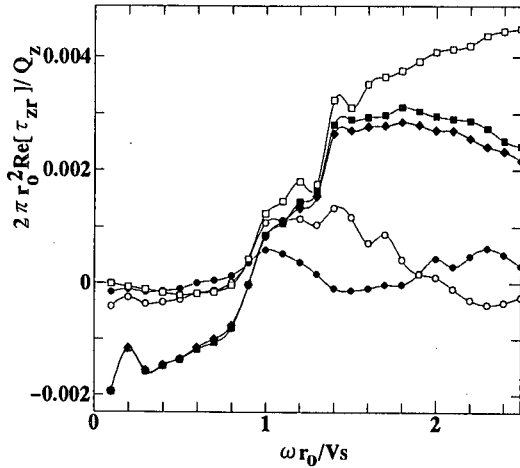
(c) 絶対値

図-6 鉛直応力 σ_z の周波数応答
($K_0 = 0.1$, $\bar{r}/r_0 = 0.5$, $L/B = 5.0$)

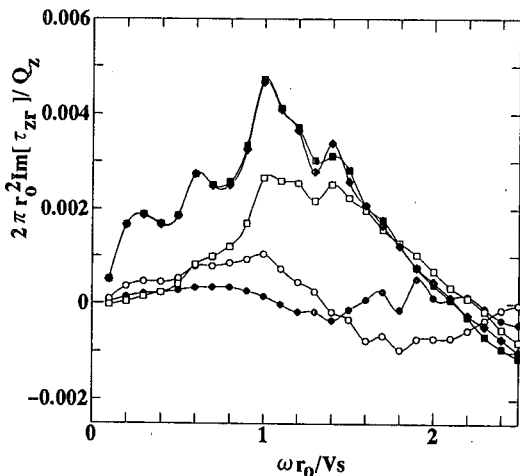
$$\sigma_p = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} (p_1 + i p_2) = \frac{Q_z}{2\pi r_0^2} \sqrt{p_1^2 + p_2^2} e^{-i\phi_p} \dots (4)$$

ここに、 ϕ_z 、 ϕ_t および ϕ_p は偏角であり、それぞれ $\tan^{-1}(z_2/z_1)$ 、 $\tan^{-1}(t_2/t_1)$ および $\tan^{-1}(p_2/p_1)$ である。

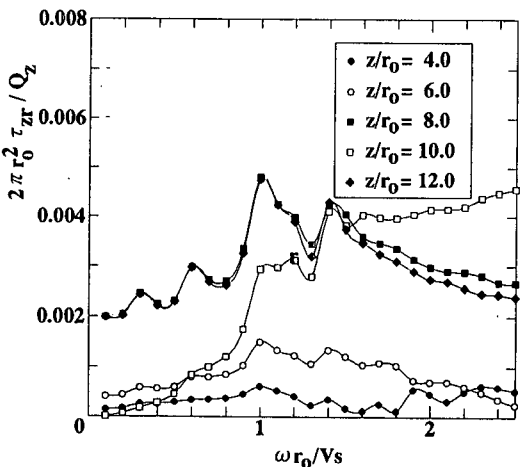
図-6は、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ および支圧板に対するアンカーロード径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.5$ の場合について、摩擦型ア



(a) 実部



(b) 虚部



(c) 絶対値

図-7 せん断応力 τ_{zr} の周波数応答

($K_0 = 0.1$, $\bar{r}/r_0 = 0.5$, $L/B = 5.0$)

ンカーロードに沿った地盤内部の5カ所における鉛直応力 σ_z の周波数応答を示したものである。地盤内部の点としては、 $z/r_0 = 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0$ である。この図より、アンカー支圧板は $z/r_0 = 10.0$ の深さに位置しているため、 z/r_0 が支圧板の深さに近づくにつれて、鉛直応力 σ_z は大きくなっていることがわかる。このことは、アンカーロード部分に作用する周面摩擦力による周辺地盤の応力への影響は $\bar{r}/r_0 = 0.5$ の場合においてはあまり大きくないことがわかる。また、海底地盤に埋設された支圧型アースアンカーによる浮体係留問題を取り扱った高谷ら(1991)の論文によれば、 $L/B = 5.0$ ($L/r_0 = 10.0$) におけるアンカー支圧板の深さはこれ以上深く支圧板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」に相当するため、アンカー支圧板を挟んで上下対称位置となる $z/r_0 = 8.0$ (■印) および $z/r_0 = 12.0$ (◆印) の鉛直応力 σ_z の実部および虚部の両方とも逆符号でほぼ同じような挙動を示していることがわかる。したがって、鉛直応力 σ_z の絶対値としては、ほぼ同じ値となっている。これは、支圧型アンカー周辺地盤の応力分布を求めた高谷ら(1993)の場合と同様の傾向を示している。ところで、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 1.0$ 付近に応答のピーク値が現れているため、摩擦型アンカーの変位応答における場合と同様に、アンカーに作用する加振外力の振動数特性に配慮する必要があるだろう。

一方、図-7は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ および支圧板に対するアンカーロード径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.5$ の場合について、摩擦型アンカーロードに沿った地盤内部の5カ所におけるせん断応力 τ_{zr} の周波数応答を示したものである。地盤内部の点としては、 $z/r_0 = 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0$ である。この図からも明かなように、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における $z/r_0 = 8.0$ (■印) および $z/r_0 = 12.0$ (◆印) のせん断応力 τ_{zr} の実部および虚部の両方ともほぼ同じような挙動を示していることがわかる。また、図-6に示されている鉛直応力 σ_z の場合と同様に、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 1.0$ 付近に応答のピーク値が現れている。

図-8は、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ および支圧板に対するアンカーロード径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.5$ なる条件下で、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ に対する摩擦型アンカー周辺地盤の間隙水圧分布 σ_p を示したものである。この図より、鉛直応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zr} の場合において見られたように、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 1.0$ におけるアンカー支圧板周辺における間隙水圧が大きな値を示しており、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs$ が高くなるにつれて、アンカー支圧板周辺地盤での間隙水圧は小さくなっていることがわかる。とくに、間隙水圧の実部の方が虚部に比べて顕著な減少を示している。これは、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 1.0$ 付近では、摩擦型アンカー周辺地盤系の減

衰定数は小さくなっているためと考えられる。したがって、この加振振動数近傍では、摩擦型アンカーの下端部に取り付けられたアンカー支圧板から周辺地盤への波動の逸散減衰効果が小さくなるため、摩擦型アンカーに作用する加振外力の振動数特性によってはアンカー支圧板周辺に大きな間隙水圧分布の発達領域が現れることになる。また、鉛直応力やせん断応力の周波数応答におけるように、支圧板に対する

アンカーロッド径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.5$ 程度ではアンカーロッド部分に作用する周面摩擦力による間隙水圧への影響はあまり大きなものとはならないことがわかる。

4. おわりに

アンカーロッド下端部に支圧板を有する摩擦型アンカー

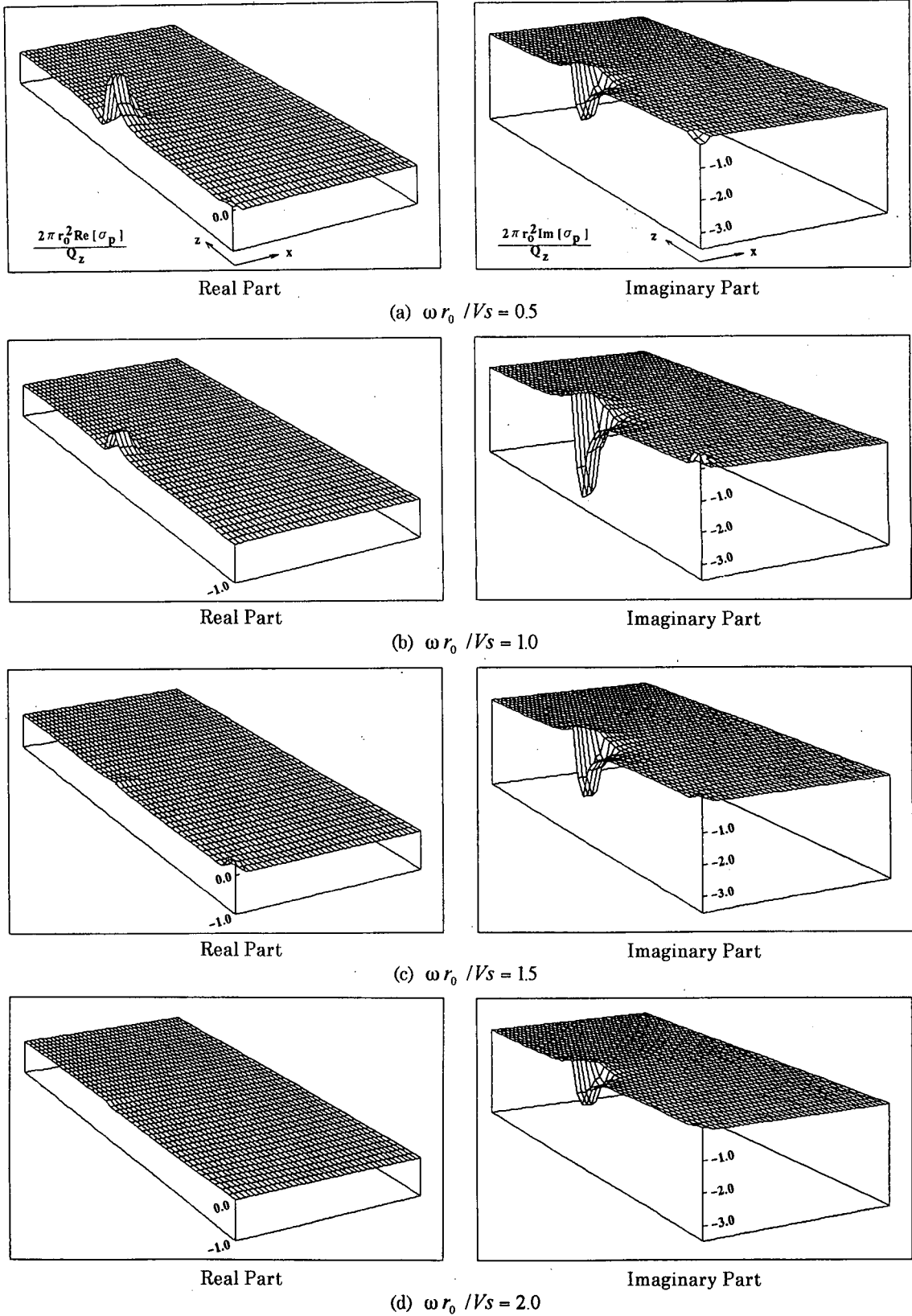


図-8 摩擦型アンカー周辺地盤の間隙水圧分布 ($K_0 = 0.1$, $\bar{r}/r_0 = 0.5$, $L/B = 5.0$)

の先頭部に周期的な加振力が作用した場合の摩擦型アンカーの変位、アンカー周辺地盤の応力および間隙水圧の周波数応答を求め、地盤の透水係数、支圧板の半径に対するアンカーロッド径の比などが摩擦型アンカーの変位、周辺地盤の応力および間隙水圧の応答特性にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

本研究において得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) アンカー支圧板の半径に対するアンカーロッド半径の比が大きくなるにつれて、アンカーロッド部分の周面摩擦の効果により、摩擦型アンカー変位は小さくなる。
- 2) アンカー支圧板の半径に対するアンカーロッド半径の比 $\bar{r}/r_0 = 0.5$ 程度では、アンカーロッド部分に作用する周面摩擦力の周辺地盤の応力および間隙水圧分布に及ぼす影響はあまり顕著なものではない。
- 3) 摩擦型アンカーのロッド部周辺地盤に比べて、アンカー先端部の支圧板周辺地盤には鉛直応力やせん断応力および間隙水圧の発達領域が見られる。
- 4) 支圧板を有する摩擦型アンカー周辺地盤の応力および間隙水圧の周波数応答は、ピーク振動数を有する。このため、時刻歴応答を求める場合には、摩擦型アンカーに作用する加振外力の振動数特性に配慮をする必要がある。

本研究は、浮体構造物の係留方法に関する基礎的研究として、周波数領域における摩擦型アンカーの変位、周辺地盤の応力および間隙水圧応答について示したが、今後は摩擦型アンカーに作用する波、流れおよび浮体構造物等による係留外力の振動数特性との観点より、アンカー周辺地盤の応答特性をより詳細に検討する必要がある。

最後に、本研究の遂行に際しては、文部省科学研究補助金(奨励研究(A)06750536)および特定研究「河川および海岸・海洋構造物の設計に関する基礎的研究」(研究代表者 高谷富也)の交付を受けたことを付記し、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 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・前野賀彦・高山知司・平石哲也(1992・a): 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、海洋開発論文集、Vol. 8、pp. 451~456.
- 高谷富也・前野賀彦・平石哲也・高山知司(1992・b): 船舶の振れ回りによる緊張係留アンカー周辺地盤の応答、海岸工学論文集、第39巻、pp. 846~850.
- 高谷富也・前野賀彦・平石哲也・高山知司(1993): 海底地盤特性を考慮した係留アンカーの応答特性に関する一考察、海洋開発論文集、Vol. 9、pp. 117~122.
- 高谷富也・前野賀彦・平石哲也・高山知司(1994): サクシオンアンカー周辺地盤の応答特性、海洋開発論文集、Vol. 10、pp. 207~212.
- 高谷富也・前野賀彦・平石哲也・高山知司(1994): 浮体係留のための摩擦型アンカーの応答特性、海岸工学論文集、第41巻、pp. 966~970.
- 前野賀彦・高谷富也・平石哲也・高山知司(1993): 浮体係留へのサクシオンアンカーの適用について、海岸工学論文集、第40巻、pp. 906~910.
- 前野賀彦・高谷富也・平石哲也・高山知司(1993): 2点係留された船舶の係留アンカー周辺地盤の応答、海洋開発論文集、Vol. 9、pp. 123~128.
- Biot, M. A. (1956): Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, J. Acoust. Soc. America, Vol. 2, pp. 168-178.
- Halpern, M. R. and Christiano, P. (1986): Response of Poroelastic Half-Space to Steady-State Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606-632.