

サクシヨンアンカー周辺地盤の応答特性

Dynamic Response of Seabed Around Suction 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

The frequency response of seabed around a suction anchor subjected to a mooring force of floating structure is numerically evaluated by taking the seabed characteristics into consideration. The seabed is assumed to be a fluid-saturated poroelastic medium whose behavior is governed by Biot's theory of wave propagation, and the suction anchor is modeled as a rigid and hollow cylinder with upper cover. The suction force acts on the surface of upper cover in suction anchor. The effect of the skirt length and of suction anchor on the response of seabed around it is investigated.

Key words: Suction Anchor, Mooring Force, Poroelastic seabed, Frequency Response of seabed

1. はじめに

沿岸域の開発に伴い海岸構造物の設置水域は、より水深の大きい沖へ、また岩盤基礎の得られにくい場所へと展開することになるものと考えられる。それらの海岸構造物の構造の一つとして浮体構造を考える場合には、その係留が重要な問題となる。そこで、高谷ら(1991)は支圧型アンカーの軟弱地盤への適用を考え、定常風を受ける係留船舶の振れ回りによる支圧型アンカー周辺地盤の応答を解析し検討している。その後、高谷ら(1992・a)は緊張係留方式の採用による船舶の振れ回りにより係留索に生じる衝撃張力の緩和効果を検証した。また、前野ら(1993・a)は、振れ回りを許容しない多点係留への適用を考えて、支圧型アンカー周辺地盤の応答特性を検討した。著者らの一連の研究により、支圧型アンカーの軟弱地盤への適用の有効性を示したが、解決されるべき問題点として支圧型アンカーの施工法が指摘された。そこで、前野ら(1993・b)は施工性のよさから大気圧を把駐力として取り込むサクシヨンアンカーの軟弱地盤への適用を考え、その適用性を検討した。その結果によれば、アンカーの変位の周波数応答は、アンカーの直径、スカートの長さおよびサクシヨンの大きさに強く依存することが明かとなった。しかしながら、実際問題への適応を考えるときには、アンカー周辺地盤の支持力に関する検証が必要である。そこで、本研究ではサクシヨンアンカー内部を含む周辺地盤内部の変位・応力および間隙水圧の発達特性に関して解析を行った。

2. 解析手法

サクシヨンアンカーは、上端が閉じられた中空の鋼管からなり、上端からの排水を認めることにより静水圧を利用して設置され、設置後上端を完全に閉じるか排水を継続することにより大気圧を把駐力に取り込むものである。図-1は、海洋におけるサクシヨンアン

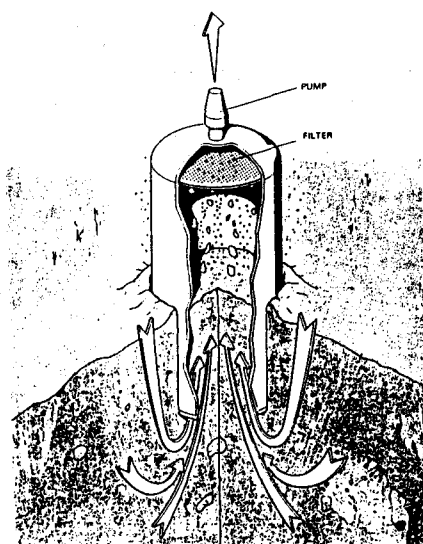


図-1 サクシヨンアンカー(Hogervorst, 1980)

カーの設置の模式図を示したものである。著者ら(1993)は、図-1に見られる海底地盤表面付近に設置されるサクシヨンアンカーのモデル化に際して図-2に見られるように上端が閉じられた中空の鋼管を想定し、サクシヨンアンカーを(等分布加振力+剛円筒) からの

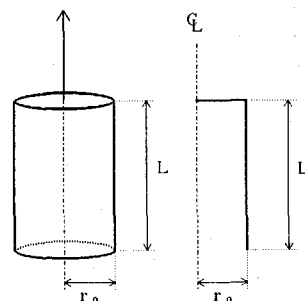


図-2 円筒状構造物

構造物と見なし、サクシヨンアンカー変位および周辺地盤の応

* 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

答特性を求める。このモデル化においては、サクシオンを等分布加振力として、サクシオンアンカーの上端部分に作用させ、円筒部分を剛円筒構造物と考慮して解析を行うものである。また、サクシオンアンカーが設置される海底地盤として、Biot(1956)が提案している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弾性地盤を仮定している。

サクシオンアンカーの上端部分に作用するサクシオンおよび剛円筒部分を考慮したサクシオンアンカー変位および周辺地盤の変位は、次式に示される円形面上に作用する等分布加振力による変位解 u_z および円周上に作用するリング状分布加振力による変位解 u_z を用いて評価を行うことができる。

(等分布加振力による変位解)

$$u_z = -\frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} \int_0^\infty \frac{U(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \dots \dots \dots (1)$$

(リング状分布加振力による変位解)

$$u_z = -\frac{q_z r_0}{2\mu} \int_0^\infty \frac{\kappa U(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} J_0(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 Q_z は等分布加振力の合力、 q_z はリング状分布加振力の荷重振幅、 r_0 は載荷面の半径、 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 、 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次のベッセル関数である。また、 β_3 、 Θ 、 $U(\kappa)$ 、 $F(\kappa)$ は波数 κ の関数である(高谷・北村, 1990)。

いま、図-3に示すように剛円筒部分を有限個のリング要素に分割し、各要素内でのリング状分布加振力を一定とし、影響係数の概念を用いて全要素の等分布リング状加振力による変位を重ね合わせる。また、等分布加振力が作用するサクシオンアンカー上面中央の変位および各

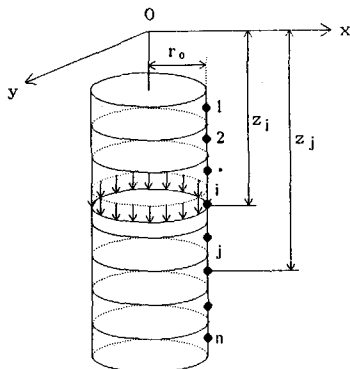


図-3 円筒部分の分割

リング要素の地盤骨格の変位が等しいという条件のもとで、サクシオンアンカー上面に作用する鉛直等分布加振力および各リング要素に作用する等分布加振力 q_z を未知とする連立一次方程式が得られる。連立一次方程式を解いて得られる未知等分布加振力およびリング状分布加振力の合力がサクシオンアンカーに作用する全加振外力に等しいという条件を用いれば、サクシオンアンカーを(等分布加振力+剛円筒)なる構造物にモデル化した場合のアンカー変位を求めることができる(前野ら, 1993)。

また、サクシオン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、次式に示すように上述した解析方法によりサクシオンアンカー変位を求めた際に得られる等分布加振力 $q_z(0)$ および各リング要素(i番目)に作用するリング状分布加振力 $q_z(i)$ による

変位・応力解を用いて容易に得ることができる。

$$v = G(r, z|0) q_z(0) + \sum_{i=1}^N G_i(r, z|i) q_z(i) \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 v はサクシオンアンカー周辺地盤における変位・応力および間隙水圧であり、 $G(r, z|0)$ 、 $G_i(r, z|i)$ はそれぞれサクシオンアンカー上面に作用する等分布加振力および円筒部分のi番目の要素による (r, z) なる位置の変位・応力および間隙水圧の影響係数である。また、 N は円筒部分における分割数である。なお、応力解および間隙水圧の詳細については、高谷ら(1992・b)の論文に譲る。

3. アンカー周辺地盤の応答について

本研究では、サクシオンアンカーが設置される海底地盤の条件として、以下に示すような飽和砂質土に対する諸弾性定数および密度等の数値(Halpern・Christiano, 1986)を用いて、サクシオンアンカーの変位および周辺地盤の変位・応力および間隙水圧の周波数応答を求める。

- $\mu = 96 \text{ MPa}$, $\lambda = 432 \text{ MPa}$, $Q = 280 \text{ MPa}$,
- $R = 274 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$ (ポアソン比)
- $f = 0.48$ (多孔質飽和弾性地盤の間隙率)
- $\rho_s = 2.67 \text{ g/cm}^3$ (弾性骨格の密度)
- $\rho_f = 1.00 \text{ g/cm}^3$ (間隙水の密度)

ここに、 Q は弾性骨格と間隙水の体積変化の間に起こる相互作用に関する連成係数、 R は間隙水の圧縮剛性に関する係数である。また、上記の ρ_s 、 ρ_f は素材としての密度である。また、本研究では無次元加振振動数 $a_0 (= \omega r_0 / Vs)$ および無次元透水係数 $K_0 (= k Vs / g r_0)$ の2つのパラメータを用いて、サクシオンアンカーおよび周辺地盤の応答特性について調べる。なお、上記の無次元パラメータ中に見られる r_0 はサクシオンアンカーの半径、 k は地盤の透水係数、 g は重力の加速度、 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、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。

(1) サクシオンアンカーの変位応答

図-4～6はそれぞれ無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合について、スカート長 $L/r_0 = 10.0$ (L : スカート長)におけるサクシオンアンカーの変位応答を、サクシオンアンカーの円筒部分の全周面摩擦力に対するサクシオンの比 P_0 をパラメータにして図示したものである。なお、 P_0 が大きくなることは、サクシオンが大きくなることを意味している。また、図中の $\text{Re} []$ および $\text{Im} []$ はそれぞれ実部および虚部を取ることを意味する。これらの図より、 P_0 が大きくなるにつれてサクシオンアンカーの変位は小さくなっている。また、サクシオンアンカーに作用する加振外力の振動数が高くなるにつれて、サクシオンアンカー変位の実部が急激に減少している。一方、変位の虚部は $\omega r_0 / Vs = 0.3$ をピークとして緩やかな減少傾向にある

ことがわかる。したがって、サクシオンアンカー変位の絶対値としては、いずれの無次元透水係数においても無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs = 0.3$ 付近に変曲点を有するものとなっていることがわかる。また、無次元透水係数 K_0 が小さくなれば、サクシオンアンカー変位も小さくなっている。これは、 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、これによるアンカー変位は小さくなっている。

図-7は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ の場合について、

サクシオンアンカーの円筒部分の全周面摩擦力に対するサクシオンの比 $P_0 = 1.0$ におけるサクシオンアンカーの変位応答を、スカート長 L/r_0 をパラメータにして図示したものである。この図より、スカート長が長くなるにつれてサクシオンアンカーの円筒部分の周面摩擦力が大きくなるため、サクシオンアンカーの変位は小さくなっている。また、サクシオンアンカー変位の実部は、無次元加振振動数が大きくなるにつれて、減少しているが、虚部にはピークが見られ、このピーク

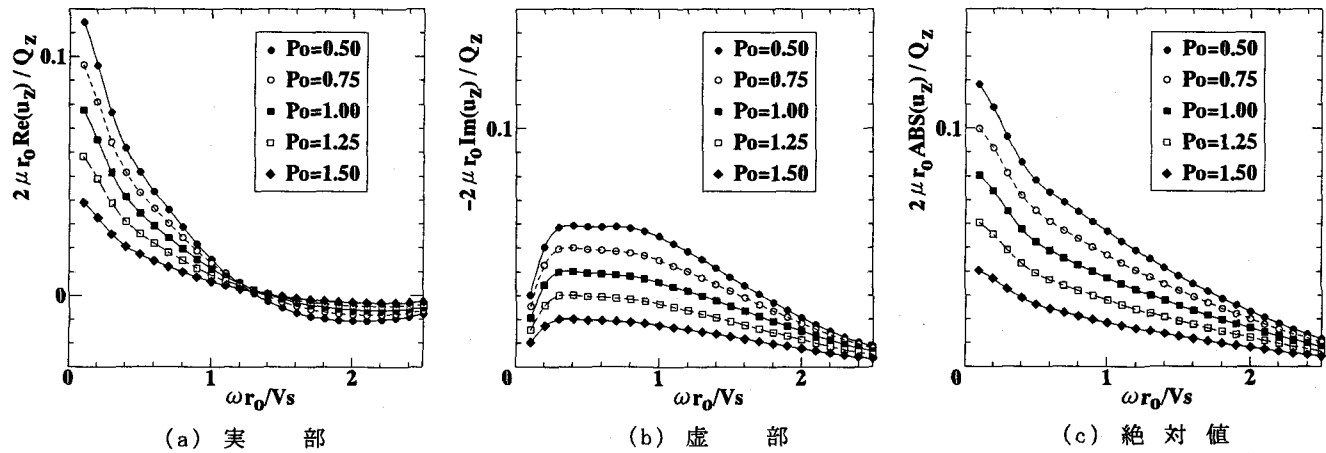


図-4 サクシオンアンカーの変位応答 ($K_0 = 10.0, L/r_0 = 10.0$)

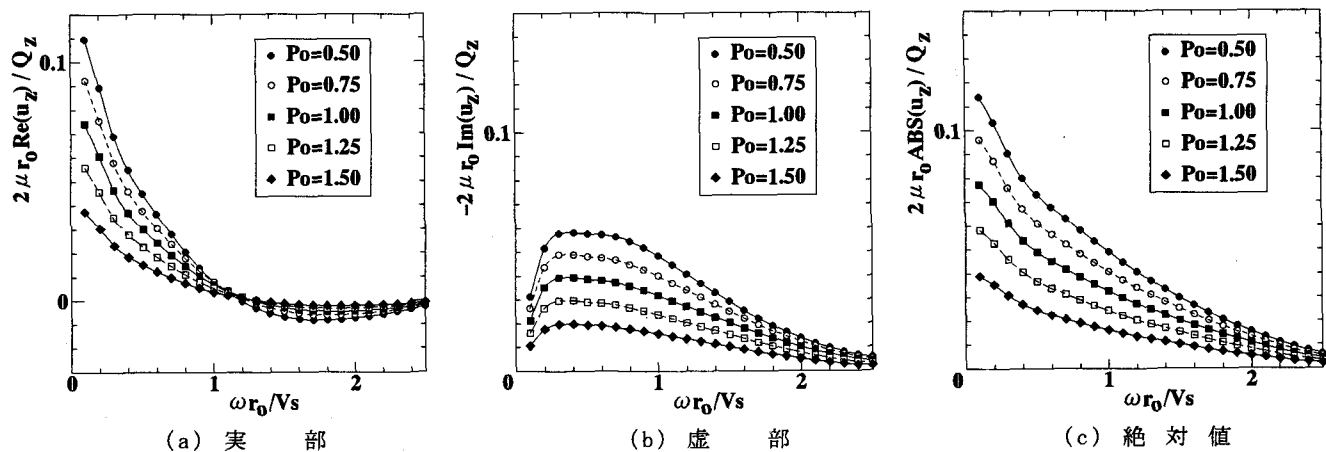


図-5 サクシオンアンカーの変位応答 ($K_0 = 0.1, L/r_0 = 10.0$)

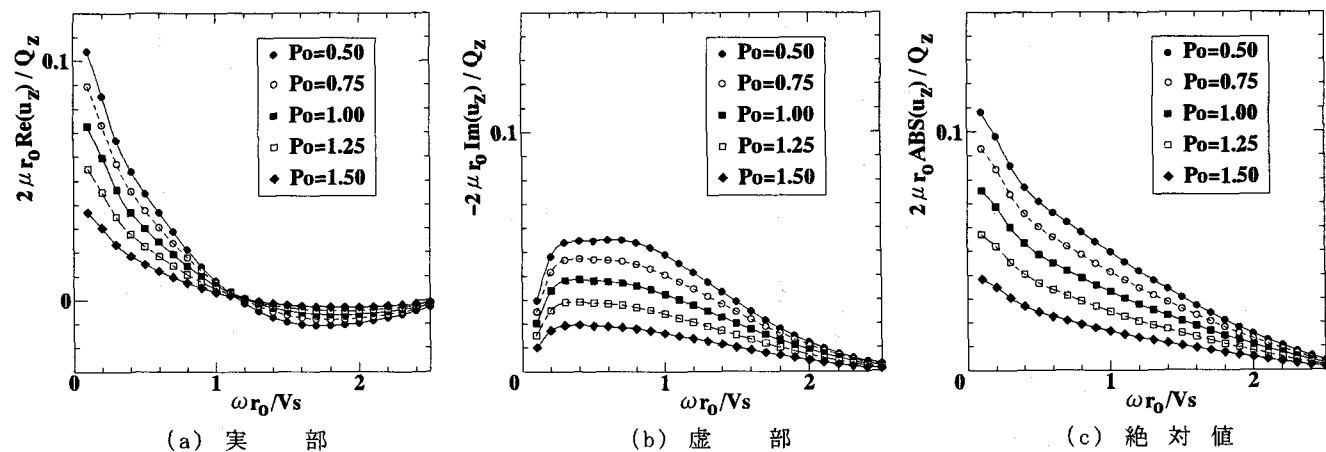


図-6 サクシオンアンカーの変位応答 ($K_0 = 0.001, L/r_0 = 10.0$)

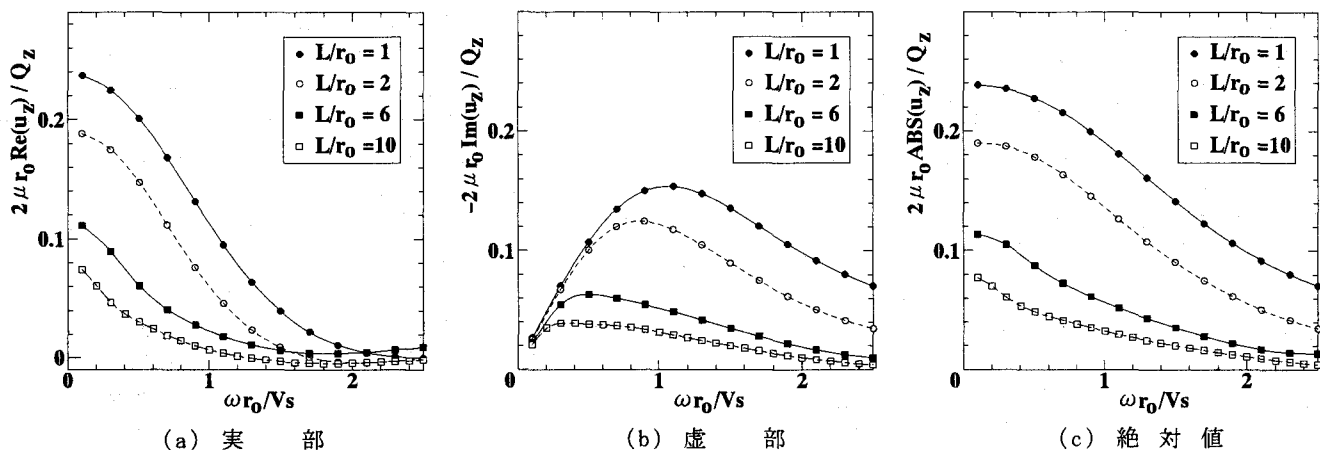


図-7 スカート長とアンカー変位の関係 ($K_0 = 0.1, P_0 = 1.0$)

はスカート長が長くなるにつれて低振動数域へと移行していることがわかる。これは、スカート長が長くなれば、サクシオンアンカーから周辺地盤への逸散減衰効果が小さくなることを示している。

(2) アンカー周辺地盤の変位応答

図-8は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ の場合について、サクシオンアンカーの円筒部分の全周面摩擦力に対するサクシオンの比 $P_0 = 1.0$ およびスカート長 $L/r_0 = 6.0$ におけるサクシオンアンカー周辺地盤の鉛直変位の実部および虚部を図示したものである。なお、無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs$ として 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 の5つのケースについて求めたものである。また、サクシオンアンカー周辺地盤の変位は、半径方向 $3r_0$ と深さ方向 $10r_0$ の範囲を図示しており、メッシュのサイズは x 方向および z 方向はそれぞれ $0.25r_0$ および $0.5r_0$ である。したがって、アンカーのスカート長が $L/r_0 = 6.0$ であるため、図中において x 方向へ4メッシュ幅および z 方向へ12メッシュ幅分がサクシオンアンカー内部の変位となる。この図より、アンカー周辺地盤の変位の実部は、無次元加振振動数が大きくなるにつれて、サクシオンアンカーからの波動が周辺地盤へ伝播している様子がわかる。とくに、無次元加振振動数が大きくなれば、サクシオンアンカー外側近傍の地盤のみが振動しており、深さ方向への波動の伝播範囲は水平方向へのそれに比べて小さいことがわかる。これは、サクシオンアンカーが海底地盤表面に設置されていることで、水平方向へのアンカーからの波動の伝播は、深さ方向に比べて地盤による拘束が少ないことによるものと考えられる。また、サクシオンアンカー内部の地盤については、加振振動数が低い場合にはアンカー変位とほぼ同じ程度の値となっている。したがって、サクシオンアンカー内部の地盤は加振振動数が低い場合にはアンカーと同じ運動をしているが、振動数が高くなるにつれてサクシオンアンカーとは異なる運動をすることがわかる。

一方、サクシオンアンカー周辺地盤の変位の虚部については、無次元加振振動数が大きくなるにつれてアンカーからの逸散減衰効果が小さくなっていることがわかる。また、変位の実部において見られたように、減衰効果はアンカーの深さ方向に比べて水平方向が大

きくなっている。これも地盤の拘束力による影響が現れているものと考えられる。

(3) アンカー周辺地盤の間隙水圧応答

図-9は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ の場合について、サクシオンの比 $P_0 = 1.0$ およびスカート長 $L/r_0 = 6.0$ におけるサクシオンアンカー内部の間隙水圧の周波数応答を示したものである。なお、間隙水圧の応答を調べている所は、 $(r/r_0, z/r_0) = (0.0, 0.0), (0.0, 2.0), (0.0, 4.0)$ の3地点である。この図より明らかなように、サクシオンが作用している $(r/r_0, z/r_0) = (0.0, 0.0)$ の位置、すなわちサクシオンアンカー上端部分における間隙水圧の応答は、加振振動数が高くなるにつれて大きくなっているが、サクシオンアンカー上端部分から離れるにつれて急激に間隙水圧の応答値は小さくなっていることがわかる。これは、サクシオンアンカー上端部分に作用するサクシオンによる間隙水圧への影響範囲がアンカー半径の1倍程度であることによるものと推察される。このことより、サクシオンアンカーの円筒部分の全周面摩擦力に対するサクシオンの比 P_0 が大きくなれば、サクシオンによる間隙水圧への影響範囲も大きくなるものと思われる。

次に、上述した地点における間隙水圧の周波数応答を用いて、サクシオンアンカーに係留力が作用した場合の時刻歴応答を検討する。図-10は平石ら(1991)が行った船首一点ブイ係留方式で係留された船舶の係留実験で得られた風速50m/s時の避泊ブイ下のアンカーチェーン張力の時刻歴変動を示したものである。

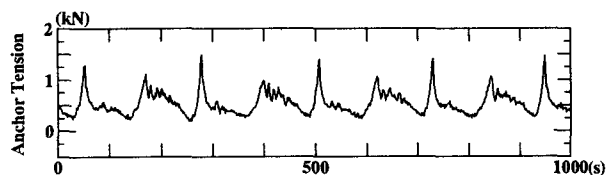
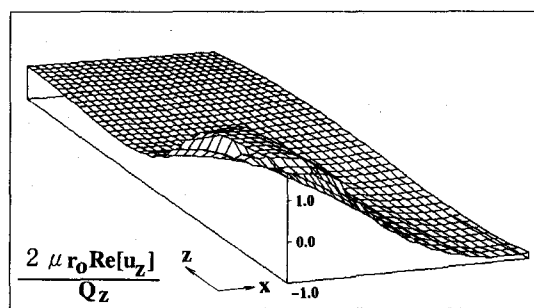
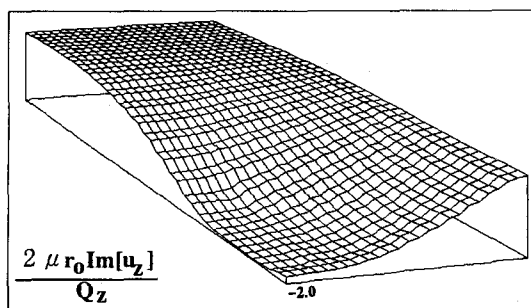


図-10 係留鎖張力の時刻歴変動

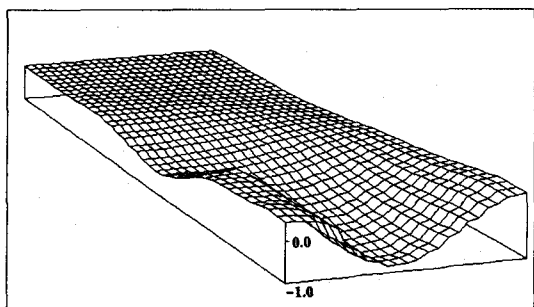
図-11は、図-10に示すアンカーチェーン張力がサクシオンアンカーに作用した場合のアンカー内部における3地点(図-9参照)での間隙水圧の応答を求めたものである。この図より、サクシオンが作用している $(r/r_0, z/r_0) = (0.0, 0.0)$ の位置、すなわちサクシ



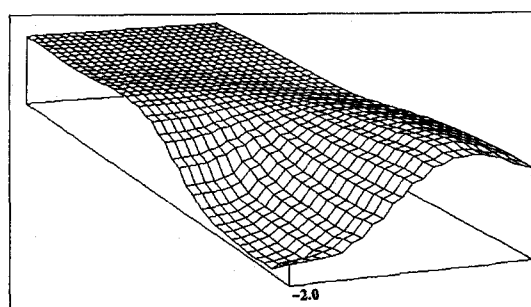
(a) $\omega r_0 / Vs = 0.5$



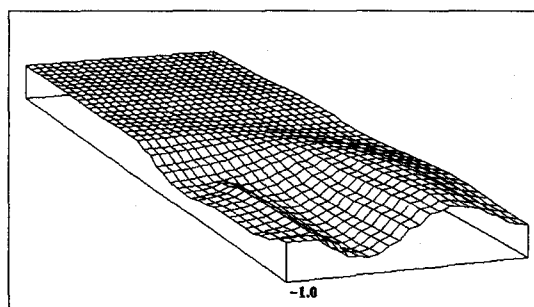
(a) $\omega r_0 / Vs = 0.5$



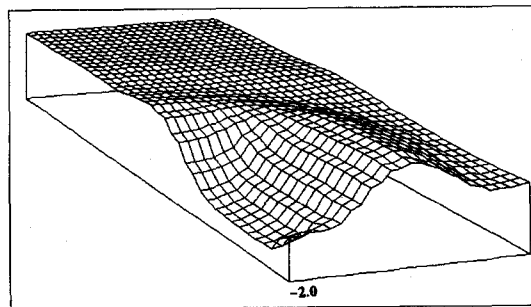
(b) $\omega r_0 / Vs = 1.0$



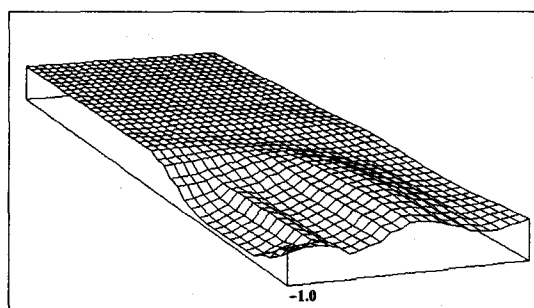
(b) $\omega r_0 / Vs = 1.0$



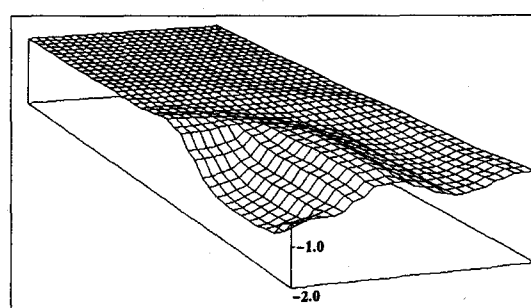
(c) $\omega r_0 / Vs = 1.5$



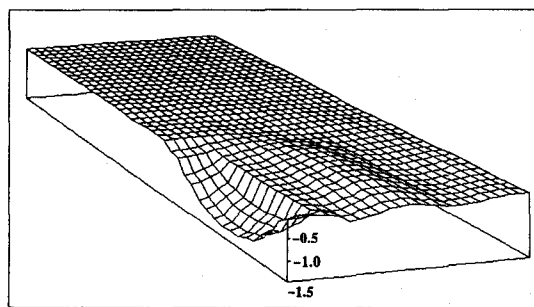
(c) $\omega r_0 / Vs = 1.5$



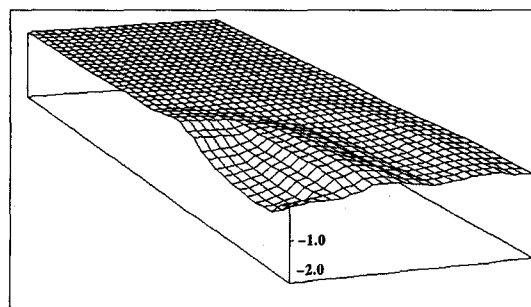
(d) $\omega r_0 / Vs = 2.0$



(d) $\omega r_0 / Vs = 2.0$



(e) $\omega r_0 / Vs = 2.5$



(e) $\omega r_0 / Vs = 2.5$

図-8 サクションアンカー周辺地盤の変位分布 ($K_0 = 0.1$, $L/r_0 = 6.0$, $P_0 = 1.0$, $x/r_0 = 0 \sim 6$, $z/r_0 = 0 \sim 10$)

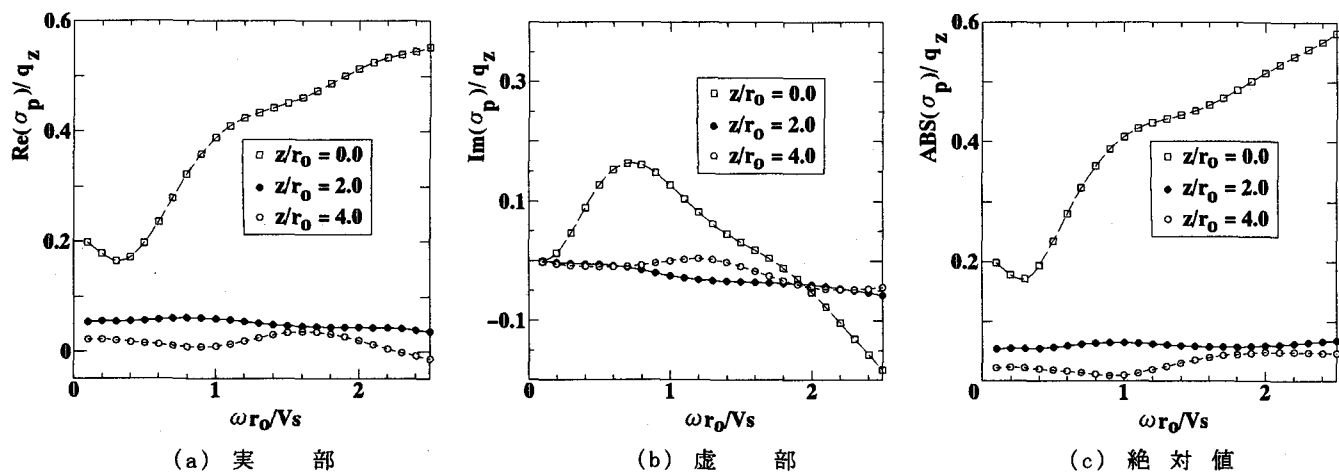


図-9 サクションアンカー内部における間隙水圧の周波数応答 ($K_0 = 0.1$, $L/r_0 = 6.0$, $P_0 = 1.0$)

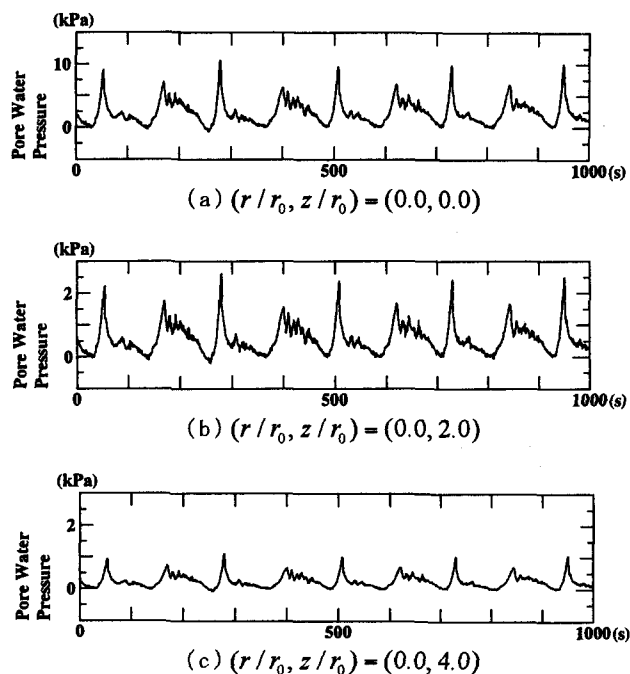


図-10 間隙水圧の時刻歴応答
($K_0 = 0.1$, $L/r_0 = 6.0$, $P_0 = 1.0$)

ンアンカー上端部分における間隙水圧の応答が極めて大きなものとなっていることがわかる。また、それぞれの地点での応答値は、図-9に示される間隙水圧の周波数応答に係留索張力の振動数特性が加わったものとなるため、単純に周波数応答から時刻歴応答値を推定することはできない。また、これらのことより、サクシジョンの比 P_0 が大きくなれば、さらにこの地点における間隙水圧の応答は大きくなるものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、浮体構造物の係留用アンカーとして、施工性のよさから大気圧を把持力として取り込むサクシジョンアンカーの軟弱地盤への適用を考え、サクシジョンアンカーを含む周辺地盤内の変位・応力および間隙水圧の発達特性に関する検討を行った。その結果、サクシジョンアンカー周辺地盤における変位・応力およ

び間隙水圧の応答特性は、海底地盤の透水性、サクシジョンアンカーのスカート長およびサクシジョン力に大きく依存する。とくに、サクシジョンアンカー内部における間隙水圧は、サクシジョン力の違いに大きく影響される。しかしながら、サクシジョン力が作用するサクシジョンアンカー上端部分から離れるにつれて、間隙水圧の応答値は急激に減少する。このため、サクシジョンアンカー上端部分に作用するサクシジョン力と間隙水圧の影響範囲に何らかの密接な関係があるものと思われる。したがって、サクシジョンアンカーの安定性を把握するには、これらの関係をより詳細に検討する必要がある。また、本研究で得られた結果より、サクシジョンアンカーの実用化に際しては、サクシジョンアンカー周辺地盤の支持力に関するより詳細な応答解析および実験等を通じて、サクシジョン力と間隙水圧の影響範囲に関する詳細な資料の積み重ねが必要になるものと思われるが、これらは今後の課題と言えよう。

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・平石 哲也・高山 知司(1992・a)：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(1992・b)：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。
- 平石 哲也・本城 智・古川 正美(1991)：避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動、海岸工学論文集、第38巻、pp.731-735。
- 前野 賀彦・高谷 富也・平石 哲也・高山 知司(1993・a)：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。
- 前野 賀彦・高谷 富也・平石 哲也・高山 知司(1993・b)：浮体係留へのサクシジョ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。
- Biot, M.A.(1956): Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid, J. Acoust. Soci. America, Vol.2, pp.168-178。
- Halpern, M.R. and Christiano, P. (1986): Response of Poroelectric Half-Space to Steady-State Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol.10, pp.606-632。
- Hogervorst, J.R. (1980) : Field Trials with Large Diameter Suction Anchor, Offshore Technology Conference, pp.217-224。