

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

Dynamic Response of Mooring Anchor Plate in Seabed Subjected to Mooring Force

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 mooring anchor plate embedded in the seabed due to a steady-state harmonic mooring force is numerically evaluated by taking the seabed characteristics into consideration. In an anchor plate-seabed interaction analysis proposed in this paper, the seabed is assumed to be a fluid-saturated poroelastic medium whose behavior is governed by Biot's theory of wave propagation, and the mooring anchor plate in seabed is assumed to be a flexible circular plate or a rigid one. The effects of both the stiffness and the mass ratio of anchor plate on the response of anchor plate are numerically investigated.

Keywords: Flexible anchor plate, Rigid anchor plate, Fluid-saturated poroelastic medium, Frequency response

1. はじめに

近年、船舶や水中トンネル等の水上および水中の浮体構造物の係留方式として、杭式基礎やアンカー式基礎などによる係留方式が考えられてきている。しかしながら、浮体を係留するための係留索や杭・アンカー等の係留用基礎構造物の挙動は、波浪や潮流等の複雑な不規則作用を受け、浮体、係留索および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。特に、係留索に作用する変動張力を考慮した係留用基礎とその周辺地盤の連成系の相互作用効果を評価することは、係留用基礎構造物の設計を行う上で極めて重要である。筆者ら(1991, 1992a, 1992b)は、既にBiotの理論(1956)に基づいて、海底地盤を土粒子骨格と間隙水の二相系とする多孔質飽和弾性体と仮定し、地表面まで完全に液体で飽和した半無限多孔質飽和弾性体内部に設置された支圧型アースアンカーに係留力が作用した場合のアンカー支圧板やその周辺地盤の周波数特性および時刻歴応答について検討している。なお、これらの研究では、支圧型アースアンカーをたわみ性円盤と仮定している。

本研究では、係留用構造物としてアンカー式基礎を想定し、アンカー支圧板の剛性および質量比の違いがアンカー支圧板の動特性に及ぼす影響について調べる。このため、Biotの理論(1956)に基づいた地盤骨格と液体の相互作用を考慮した応力-ひずみ関係および運動方程式より得られる多孔質飽和地盤内部の鉛直分布加振力を用いてリング分布加振力による変位解の誘導を行った。次いで、これらの変位解を用いて、アンカー支圧板をたわみ性円盤および剛円盤とした場合について、支圧板とその周辺地盤の連成系の動的相互作用解析よりアンカーの変位応答を求めた。これにより、海底地盤特性を考慮した地盤骨格と液体の二相系から構成される多孔質飽和弾性

地盤に埋設された係留アンカーの応答特性について検討した。

2. 解析手法

アンカー支圧板が設置されている多孔質飽和弾性体は、空隙を有する弾性骨格とその空隙を完全に満たす圧縮性の液体で構成されているものである。本研究では、周期的な加振力を受けるアンカー支圧板とその周辺地盤の連成系において、アンカー支圧板をたわみ性円盤および剛円盤の2つの場合に仮定して動的応答解析を行う。

(1) アンカー支圧板をたわみ性円盤とする場合

アンカー支圧板を剛性をもたないたわみ性円盤と仮定する場合には、図-1に示すように地表面まで完全に液体で飽和した半無限多孔質飽和弾性体内部の

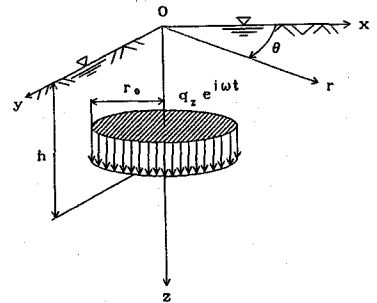


図-1 鉛直等分布加振力

円形面上に鉛直分布加振力(以下、鉛直等分布加振力と呼ぶ)が作用する場合を想定し、次式に示す鉛直等分布加振力による弾性骨格の変位解を用いてアンカー支圧板の応答解析を行う。なお、鉛直等分布加振力はすべて弾性骨格のみが受け持つと仮定して鉛直変位解の誘導を行っている(高谷・北村, 1990)。

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

ここに、 Q_z は加振力の合力($=\pi r_0^2 q_z$)、 r_0 は載荷

* 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 建設学科土木コース

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

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。なお、上式の被積分関数に見られる波数 κ の関数である β_3 、 Θ 、 $F(\kappa)$ 、 $U(\kappa)$ の詳細については高谷・北村(1990)の文献に譲る。

(2) アンカー支圧板を剛円盤とする場合

アンカー支圧板を剛円盤と仮定する場合には、地表面のフーチング基礎に対してLysmer・Richart(1966)が行った解析手法に準拠して、図-2に示すように剛円盤と多孔質飽和弾性体との接触面を有限個の同心リング要素に分割する。次いで、各要素内での加振力を一定とし、影響係数の概念を用いて、全要素の等分布リング加振力による変位を重ね合わせる。これより、各要素に作用する未知等分布リング加振力に関する連立一次方程式を解く問題に帰着させることができる(高谷・北村, 1992)。

いま、半無限多孔質飽和弾性体内部に面積 S の剛円盤が存在する場合、接触圧分布は次式の積分方程式を解くことによって求められる。

$$u_z = \int_0^{r_0} G_{ss}(r|\bar{r}) q_z^s(\bar{r}) d\bar{r} \quad (\bar{r} \leq r_0) \dots (2)$$

ここに、 $q_z^s(\bar{r})$ は接触面 S 内の弾性骨格に作用する未知等分布リング加振力である。 $G_{ss}(r|\bar{r})$ は、中央より $\bar{r}$ なる距離で弾性骨格に単位振幅の等分布リング加振力が作用した場合の r なる距離に生じる弾性骨格の変位である。

さらに、図-2に示す分割モデルに対して、式(2)は次式のように離散化される。

$$\bar{u}_z(j) = \sum_{i=1}^m [\bar{G}_{ss}(j|i) \bar{q}_z^s(i)] S_i \quad (j=1, 2, \dots, m) \dots (3)$$

ここに、 $\bar{u}_z(j)$ は j 要素中央点の骨格の変位、 $\bar{q}_z^s(i)$ は i 要素の骨格に作用する等分布リング加振力の振幅、 m は剛円盤の同心リング分割要素数、 S_i は i 要素の面積である。また、 $\bar{G}_{ss}(j|i)$ は i 要素に作用する単位振幅の等分布リング加振力による j 要素の骨格の変位を表す影響係数で、式(1)に若干の変形操作を施すことにより次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{G}_{ss}(j|i) = & -\frac{r_0}{2\mu} \int_0^\infty \frac{U(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} \\ & \cdot \left\{ \frac{r_{i+1}}{r_0} J_1(\kappa r_{i+1}) - \frac{r_i}{r_0} J_1(\kappa r_i) \right\} \\ & \cdot J_0(\kappa \bar{r}_j) d\kappa \dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 $\bar{r}_j = (r_j + r_{j+1})/2$ である。

したがって、各要素の骨格の変位 $\bar{u}_z(j)$ が既知であれば、式(3)より各要素の等分布リング加振力 $\bar{q}_z^s(i)$ を未知とする連立一次方程式が得られる。いま、剛円盤の鉛直変位を Δ とすれば、各要素の変位が $\bar{u}_z(j) = \Delta$ で与えられ、等分布リング加振力 $\bar{q}_z^s(i)$ が計算される。また、得られた未知等分布リング加振力の合力が剛円盤に作用する加振力 Q_z に等しいという次式の条件を用いれば、剛円盤の変位 Δ が得られる。

$$Q_z = \sum_{i=1}^m \bar{q}_z^s(i) \dots (5)$$

3. 数値計算結果とその考察

本研究では、多孔質飽和弾性体の諸弾性定数および密度等の数値として、Halpern・Christiano(1986)が用いた粗い飽和砂質土に対するものを用いた。なお、アンカー支圧板を剛円盤とする場合の接触面の同心リング要素数は $m=10$ とした。

$$\begin{aligned} \mu &= 98 \text{ MPa} & \lambda &= 432 \text{ MPa} \\ Q &= 280 \text{ MPa} & R &= 274 \text{ MPa} \\ \nu &= 0.3 \text{ (ポアソン比)} \\ f &= 0.48 \text{ (多孔質飽和弾性体の間隙率)} \\ \rho_s &= 2.67 \text{ g/cm}^3 \text{ (弾性骨格の密度)} \\ \rho_f &= 1.0 \text{ g/cm}^3 \text{ (液体の密度)} \end{aligned}$$

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される。

$$\rho_{11} + \rho_{12} = (1-f) \rho_s, \quad \rho_{12} + \rho_{22} = f \rho_f \dots (6)$$

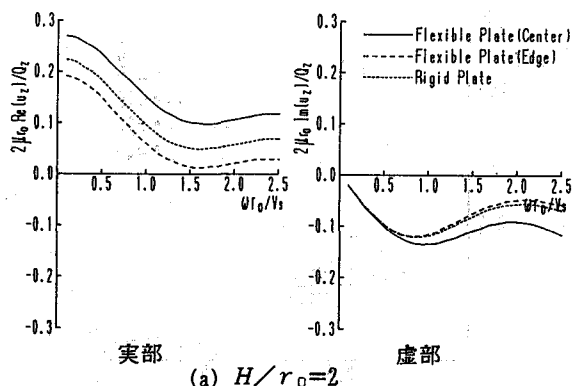
ここで、 ρ_{12} は仮定の密度で、負の値をとるが、この ρ_{12} に関しては、Halpern・Christiano(1986)、小堀・立川(1974)は、加振解の数値計算に当たって、 ρ_{12} に関する実用的なデータが得られていないことから、質量連成係数 $\rho_{12} = 0$ と仮定している。そこで、種々の検討を踏まえて、本研究では $\rho_{12} = 0$ とする。

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る(小堀・立川, 1974)。

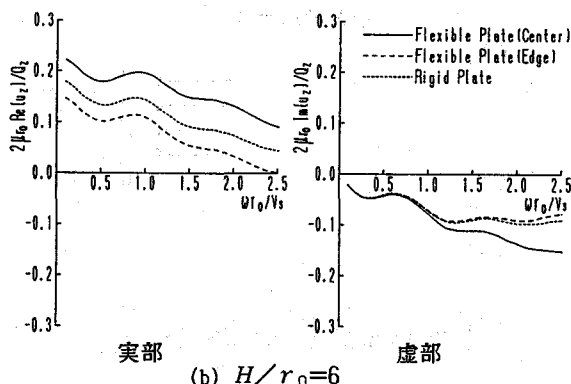
$$\frac{b}{\omega \rho_s} = f^2 \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{1}{\alpha_0 K_0} \dots (7)$$

ここに、 $\alpha_0 (= \omega r_0 / V_s)$ 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、 $10 \sim 10^{-3}$ 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。

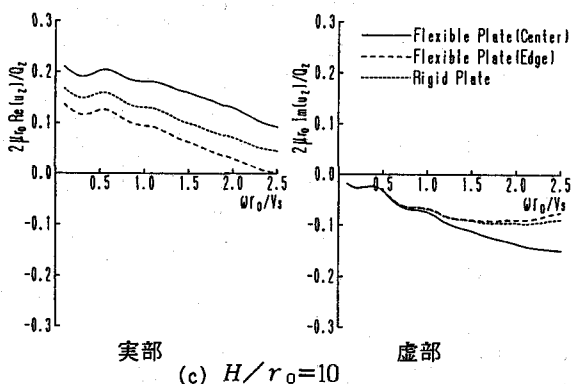
図-3、4は、それぞれ無次元透水係数 $K_0 = 10.0$ および 0.001 の場合について、アンカーの無次元埋設深さ



(a) $H/r_0=2$



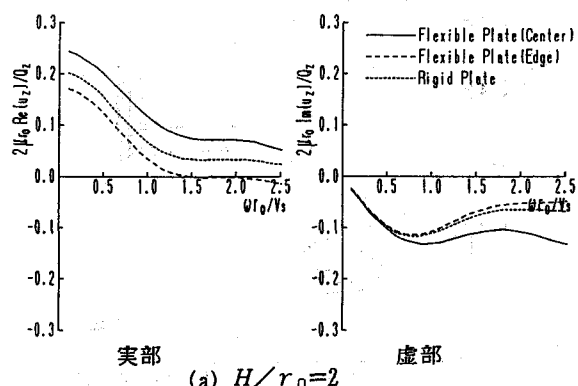
(b) $H/r_0=6$



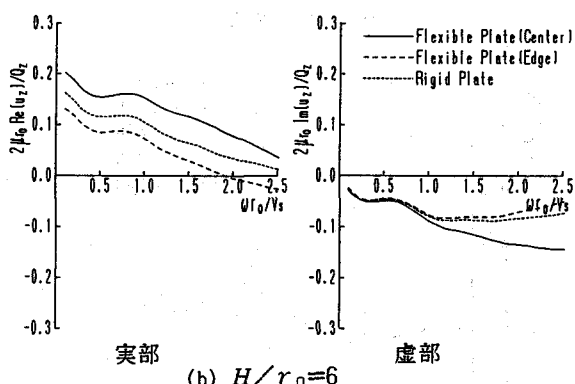
(c) $H/r_0=10$

図-3 アンカー支圧板の変位 ($K_0=10.0$)

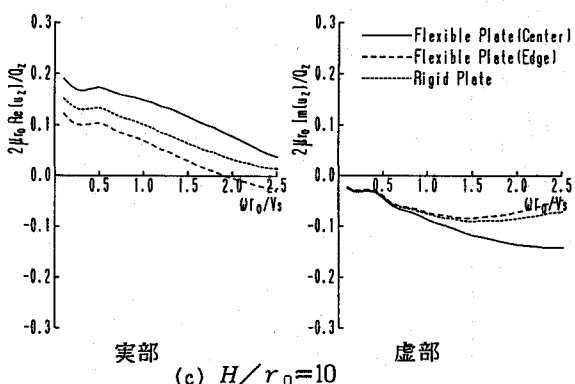
$H/r_0 = 2, 6, 10$ (H : アンカー支圧板の埋設深さ) におけるたわみ性円盤の中央変位および剛円盤の変位の周波数応答を示したものである。また、参考のために、たわみ性円盤の端部変位も図示しておいた。なお、アンカー支圧板に作用する引き揚げ加振力の無次元加振振動数 $\omega r_0/Vs$ の範囲は $0.1 \sim 2.5$ としている。また、図中の $Re[]$ および $Im[]$ は、それぞれ実部および虚部を取ることを意味する。これらの図より、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、アンカー支圧板の埋設深さが深くなるにつれてアンカー変位は小さくなっていることがわかる。また、アンカーの埋設深さ H/r_0 が $6, 10$ の場合におけるたわみ性円盤および剛円盤の変位はほぼ同じ程度の値となっている。このことは、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』が $H/r_0=6 \sim 10$ 付近に存在することを意味している。さらに、無次元透水係数 K_0 が小さくなれば、液体の粘性による減衰が大きくなるため、アンカー変位は小さくなる傾向を示している。一方、いずれの埋設深さにおいても、アンカー支圧



(a) $H/r_0=2$



(b) $H/r_0=6$



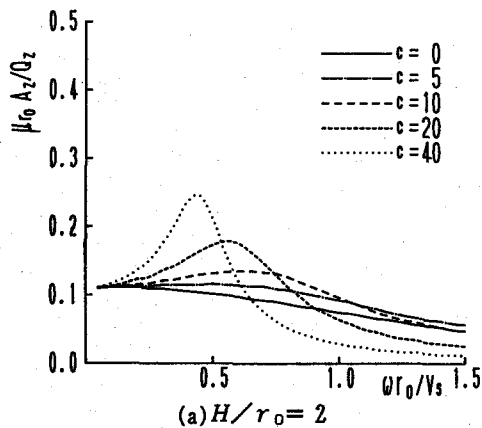
(c) $H/r_0=10$

図-4 アンカー支圧板の変位 ($K_0=0.001$)

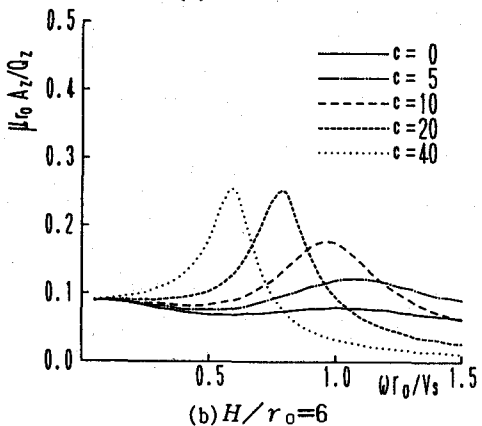
板を剛円盤とした場合の変位は、たわみ性円盤とした場合の中央変位と端部変位の間に位置しており、無次元加振振動数が低い範囲では、剛円盤の変位の虚部とたわみ性円盤のそれは一致しているが、加振振動数が高くなるにつれて剛円盤の虚部はたわみ性円盤の端部変位の虚部に近い挙動をしていることがわかる。

次に、アンカー支圧板の剛性の違いがアンカーの動的応答特性にどのような影響を及ぼすかについて調べる。すなわち、たわみ性円盤の中央変位、端部変位および剛円盤の変位を用いて、アンカー支圧板の質量比を考慮した場合の支圧板の変位振幅と加振振動数の関係について述べる。なお、質量比 c およびアンカー支圧板の振幅 A_z については次式に示す半無限弾性体上のフーチング基礎の鉛直振動について行ったものを用いる (岩崎・嶋津, 1975)。

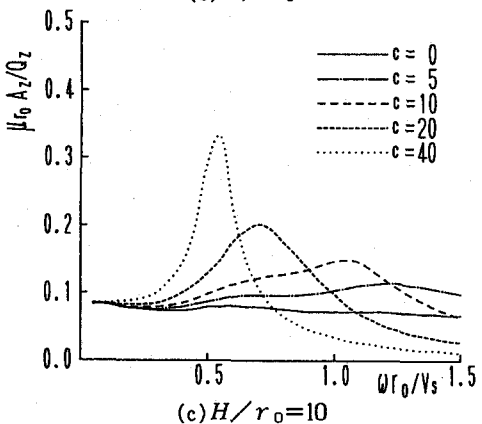
$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{m_p}{\rho r_0^2} \\ A_z &= \frac{Q_z}{\mu r_0} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - c a_0^2 f_1)^2 + (c a_0^2 f_2)^2}} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$



(a) $H/r_0 = 2$



(b) $H/r_0 = 6$



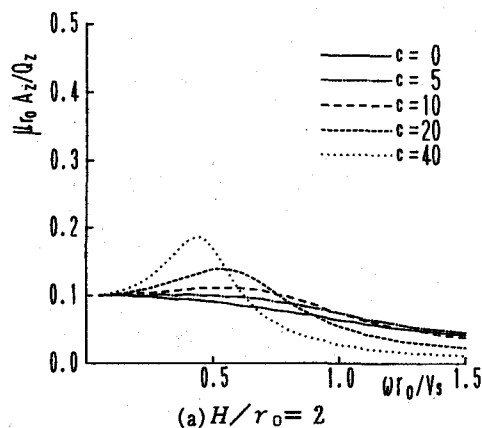
(c) $H/r_0 = 10$

図-5 剛円盤の振幅と振動数の関係 ($K_0=10.0$)

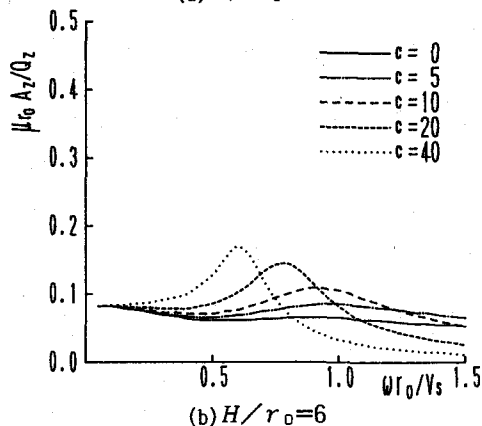
ここに、 ρ および m_p はそれぞれ多孔質飽和弾性体の密度および剛円盤の質量である。また、 f_1 、 f_2 は、次式に示すようにそれぞれ円盤の鉛直変位 u_z を表す無次元係数項の実部および虚部である。

$$u_z = \frac{Q_z}{\mu r_0} (f_1 + i f_2) \quad \dots\dots (9)$$

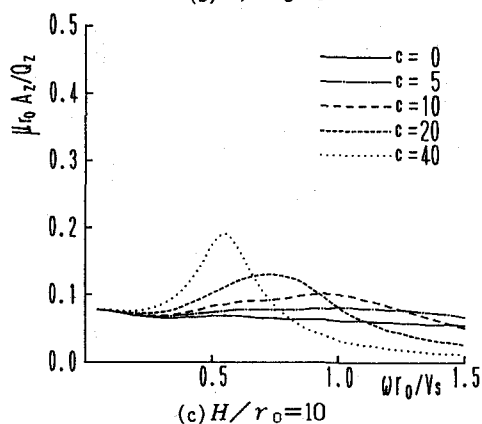
図-5、6 はそれぞれ無次元透水係数 $K_0 = 10.0$ および 0.001 において、加振力を一定とし剛円盤の質量比を考慮した場合の剛円盤の周波数応答を、無次元埋設深さ $H/r_0 = 2, 6, 10$ について示したものである。これらの図より、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、質量比 c が大きくなるとともに、剛円盤の応答のピーク振動数は無次元加振振動数の低い方へ移動し、応答のピーク値は大きくなり、振動系の減衰定数は小さくなっている。これは、質量比 c が大きくなると、剛円盤から地盤への逸散減衰効果が小さくなることを示してい



(a) $H/r_0 = 2$



(b) $H/r_0 = 6$



(c) $H/r_0 = 10$

図-6 剛円盤の振幅と振動数の関係 ($K_0=0.001$)

る。また、無次元透水係数 K_0 が小さくなれば、液体の粘性による減衰が大きくなるため、周波数応答のピーク値は小さくなっていることがわかる。したがって、透水係数が大きい地盤に設置するアンカー支圧板の質量比が大きくなれば、『限界深さ』にアンカーを設置してもアンカー変位の振幅が大きくなる可能性があるため、設置するアンカー支圧板の質量比に注意を払う必要がある。

図-7~9 は、それぞれ無次元埋設深さ $H/r_0 = 2, 6, 10$ の場合において、無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ 、質量比 $c = 20$ について、たわみ性円盤の中央変位、端部変位、平均変位および剛円盤の変位より求めたアンカー支圧板の周波数応答を示したものである。なお、本研究における平均変位とは、たわみ性円盤の中央変位と端部変位の平均を意味する。これらの図より、剛円盤の応答曲線は、たわみ性円盤の中央変位から求めた応答曲線と端部変位より求めた応答曲線の間に位置し

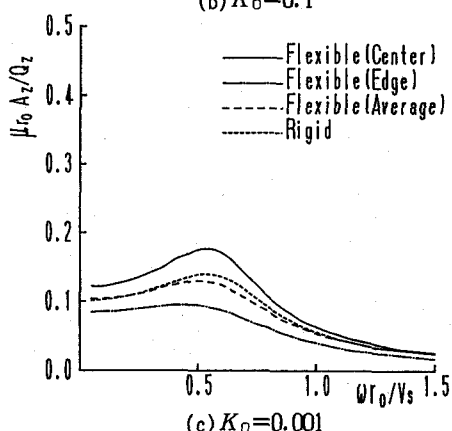
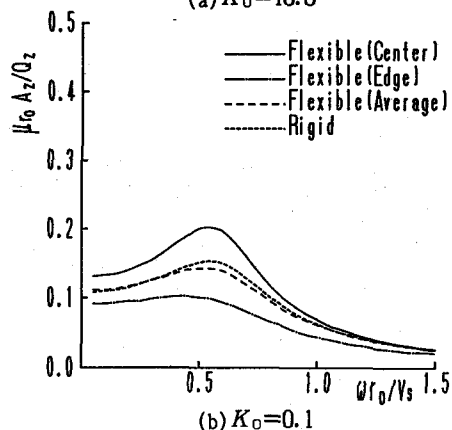
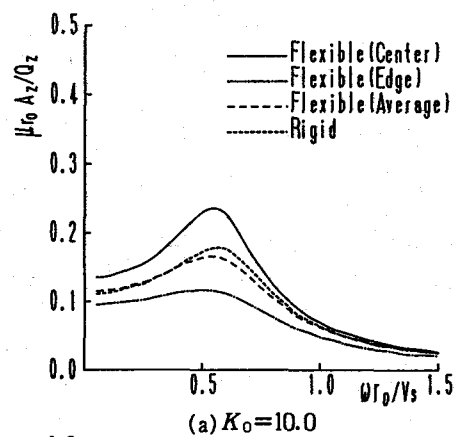


図-7 アンカー支圧板変位の周波数応答 ($H/r_0=2$, $c=20$)

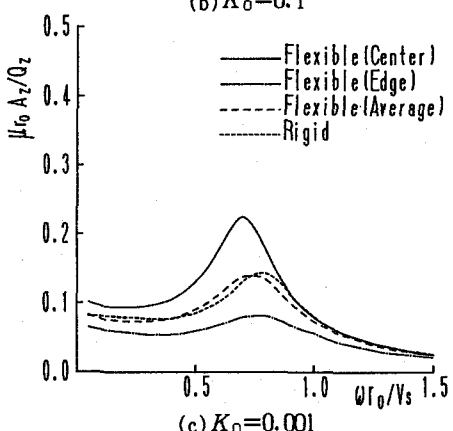
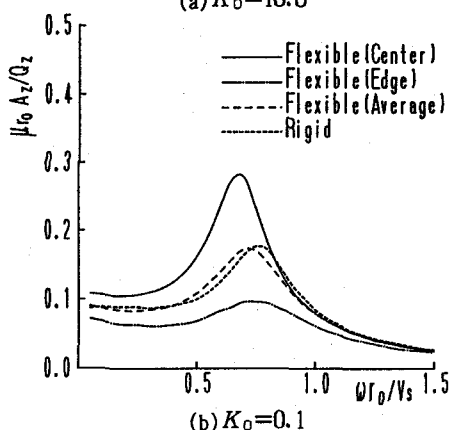
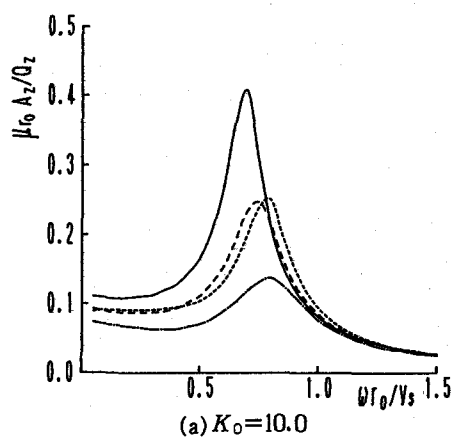


図-8 アンカー支圧板変位の周波数応答 ($H/r_0=6$, $c=20$)

ている。また、いずれの埋設深さにおいても、無次元透水係数 K_0 が小さくなれば、液体の粘性による減衰が大きくなるためピーク値は小さくなっている。さらに、いずれの埋設深さにおいても、たわみ性円盤の平均変位から求めた応答曲線と剛円盤の応答曲線は、ピーク値は違うものの、ほぼ同じような応答を示めていることがわかる。特に、無次元透水係数 $K_0=0.001$ で、埋設深さ $H/r_0=10$ の場合には、たわみ性円盤の平均変位から求めた応答曲線と剛円盤のそれは、ほぼ同じ程度の値となっている。このことは、たわみ性円盤の解析に比較して煩雑な解析手法を用いて得られる剛円盤の変位を用いる代わりに、たわみ性円盤の中央変位と端部変位から得られる平均変位を用いれば、たわみ性円盤の応答曲線より剛円盤の応答をある程度推定することが可能であることを示しているものと思われる。また、係留用のアンカ

一支圧板を設計する際、アンカー支圧板の剛性を調節することによって、支圧板の動的応答特性に影響を及ぼすことが有り得ることを示唆しているものである。

4. あとがき

本研究は、半無限多孔質飽和弾性体内部に設置されたアンカー支圧板をたわみ性円盤および剛円盤の2つの場合に仮定し、アンカーに周期的な加振力が作用した場合のアンカーの動的応答解析を行った。剛円盤の解析では、剛円盤を同心リング要素に分割し、リング分布加振力による変位解を用いて剛円盤の変位を求め、たわみ性円盤との比較を通じてアンカー支圧板の埋設深さや地盤の透水係数の違いなどがアンカー変位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。また、アンカー支圧板を設計する場合において重要と考えられる支圧板

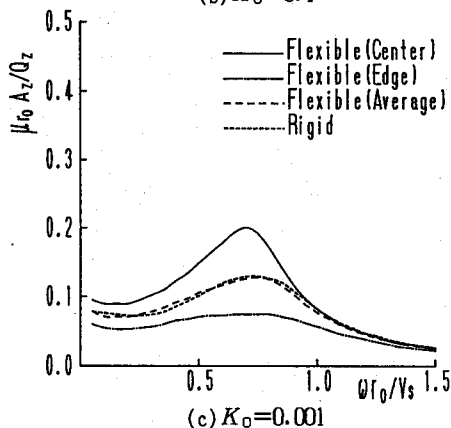
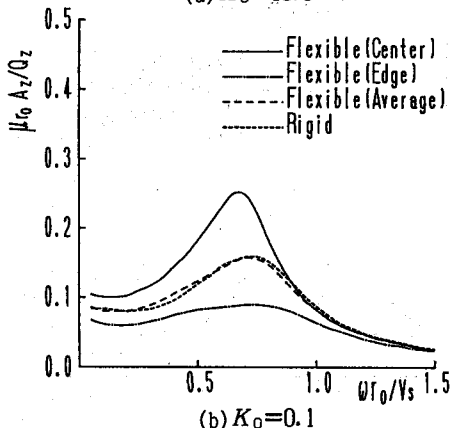
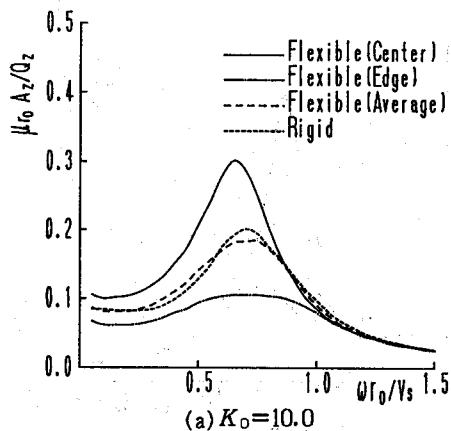


図-9 アンカー支圧板変位の周波数応答
($H/r_0=10$, $c=20$)

の剛性の違いがアンカーの応答特性に及ぼす影響について、たわみ性円盤および剛円盤の質量比を考慮した場合の支圧板変位の応答特性について調べた。本研究において得られた結論をまとめると以下ようになる。

1) アンカー支圧板を剛円盤とした場合、剛円盤変位の实

部はたわみ性円盤の平均変位とほぼ同じであるが、変位の虚部はたわみ性円盤における端部変位に近い挙動をする。

- 2) たわみ性円盤の平均変位から求めた応答曲線と剛円盤のそれは、いずれの無次元透水係数 K_0 についてもピーク値は違うものの、ほぼ同じ程度の値となる。
- 3) たわみ性円盤の中央変位と端部変位から得られる平均変位を用いれば、たわみ性円盤の変位応答より剛円盤の変位応答をある程度推定することができる。
- 4) アンカー支圧板を設計する場合には、支圧板の剛性の違いによりアンカー変位の応答曲線におけるピーク振動数が異なるため、アンカー支圧板の剛性および質量比が重要な要因となり得る。

最後に、本研究は、日本大学、舞鶴工業高等専門学校および運輸省港湾技術研究所との共同研究「海底地盤を考慮した浮体構造物の係留法に関する研究」および文部省科学研究費補助金（奨励研究(A)04750484）のもとで遂行されたことを付記し、関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 岩崎敏男・嶋津晃臣共訳(1975): 土と基礎の振動、鹿島出版会、pp. 210~218.
- 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・北村泰寿(1992): 半無限多孔質飽和弾性体表面における剛円盤の鉛直複素剛性に関する一考察、構造工学論文集、Vol. 38A、pp. 653~661.
- 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.
- 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 Poroelastic Half-Space to Steady-State Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606~632.
- Lysmer, J. and Richart, F. E. Jr. (1966): Dynamic Response of Footings to Vertical Loading, J. Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 92, No. SM 1, pp. 65~91.