

浮体係留へのサクシオンアンカーの適用について

前野 賀彦*・高谷 富也**・平石 哲也***・高山 知司****

1. 序 論

従来より半永久的な浮体構造物の係留は、岩盤基礎への適用がほとんどであるが、海洋構造物の設置水域の拡大に伴って軟弱地盤への適用も考慮されるべきである。軟弱地盤を伴う海域において、従来の杭打ちやコンクリート置換等による基礎形式を選択するには、軟弱層の厚さや規模等考慮されるべき問題がある。また、例えば海洋汚濁防止膜のように埋め立て工事等の期間一時的に設置され、工事終了後に撤去される設備や、海洋工事や調査に供される大型作業船などの一時的係留には、従来より重力式シンカーが用いられてきているが、大きな死荷重を要求される上に、軟弱地盤上に設置する場合には、シンカーが地盤中に埋没し、さらには設置期間が長期化した場合には、引き揚げのための作業用フックが腐食し、引き揚げに際して多大の注意と労力を払う必要が発生することが知られている。そこで、死荷重の取り扱いによる煩わしさから解放され、打ち込み掘削を伴わない設置法による、撤去が容易であり繰り返し利用が可能であるアンカー形式の開発が必要とされている。

高谷ら(1991)は軟弱地盤への支圧型アンカーの適用を考え、定常風を受ける係留船舶の振れ回りによるアンカー周辺地盤の応答を、平石ら(1991)の実験結果に基づいて解析している。また、高谷ら(1992)は、船舶の振れ回りによる係留索・係留鎖張力への緊張係留方式の利用による緩和効果を検討している。一方、船舶の振れ回りを許容しない多点係留方式への支圧型アンカーの適用を考え、前野ら(1993)は平石・高山(1992)が行った船舶の双錨泊実験結果を用いてアンカーおよび周辺地盤の応答を解析している。しかしながら、支圧型アンカーの軟弱地盤への適用可能性が認められるものの、経済的施工法の検討が問題として残る。

ところで、軟弱地盤での浮体係留に関して、最近サクシオンアンカーの適用が考えられている(例えば、

Senpere・Auvergne, 1982)。このアンカーは、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持力に取り込むものである。

このような状況を考慮して、本研究ではサクシオンアンカーを円筒状の構造物と考えた解析手法を提案し、多点係留方式における係留アンカーとして、サクシオンアンカーの適用性を検討した。なお、多点係留張力に関する実験結果として、平石ら(1991)が行った双錨泊された船舶の係留張力に関する実験結果を用いて、サクシオンアンカーの応答特性を調べ、浮体構造物の多点係留方式への適用を調べた。

2. サクシオンアンカーの解析手法

本節では、Biot(1956)の理論に基づいて、海底地盤を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と仮定し、多孔質飽和弾性地盤表面に設置されたサクシオンアンカーのモデル化とその解析手法を提案する。

サクシオンアンカーは、図-1に見られるように上端が閉じられた中空の鋼管からなるため、本研究ではサクシオンアンカーを(等分布加振力+剛円筒)からなる構造物にモデル化して、サクシオンアンカー変位の周波数応答を求める。

いま、サクシオンアンカーを図-1に示すように上端部分が閉じた円筒状構造物、すなわちサクシオン力を等分布加振力としサクシオンアンカーの円筒部分を剛円筒構造物と考えて解析を行う。ここでは、等分布加振力部分と剛円筒部分に分けて説明する。図-2に示すように多孔質飽和弾性地盤内部の円形面上に鉛直方向に等分布に作用する加振力(以下、鉛直等分布加振力と

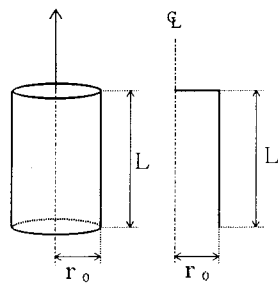


図-1 円筒状構造物

* 正会員 農博 日本大学短期大学部助教授 建設学科土木コース

** 正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校講師 土木工学科

*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所主任研究員 水工部波浪研究室

**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所部長 水工部

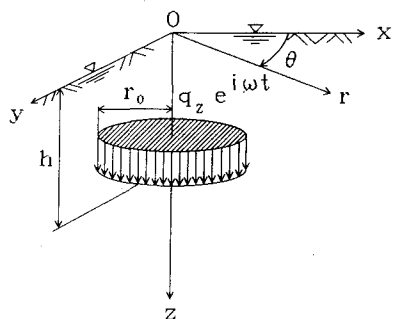


図-2 鉛直等分布加振力

呼ぶ)による地盤骨格の鉛直変位解 u_z は、次式で与えられる (高谷・北村, 1990)。

$$u_z = -\frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} \int_0^\infty \frac{U(x)}{\beta_3 \Theta F(x)} J_1(xr_0) J_0(xr) dx \quad \cdots (1)$$

ここに、 Q_z は加振力の合力 ($=\pi r_0^2 q_z$)、 r_0 は載荷面の半径、 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ 、 x は波数、 μ は多孔質飽和弾性体のせん断弾性係数、 $J_0(\quad)$ 、 $J_1(\quad)$ 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、上式の被積分関数中に見られる β_3 、 Θ 、 $F(x)$ 、 $U(x)$ は波数 x の関数である (高谷・北村, 1990)。

一方、剛円筒部分については、図-3に示すように剛円筒と多孔質飽和弾性地盤との円筒接触面を有限個の円筒リング要素に分割する。次に、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状加振力による変位を重ね合わせ

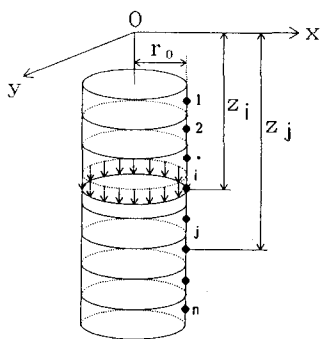


図-3 円筒部分の分割

る。これより、各要素に作用する未知等分布リング状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。

いま、多孔質飽和弾性地盤内部にスカート長 L の剛円筒が存在する場合、接触圧分布は次式に示す積分方程式を解くことにより求めることができる。

$$u_z = \int_0^L G_{ss}^R(r_0, z|r_0, \bar{z}) q_z^R(r_0, \bar{z}) d\bar{z} \quad \cdots (2)$$

ここに、 $q_z^R(r_0, \bar{z})$ は $(r_0, \bar{z})$ なる位置の地盤骨格に作用する未知等分布リング状加振力、また、 $G_{ss}^R(r_0, z|r_0, \bar{z})$ は、 $(r_0, \bar{z})$ なる位置の地盤骨格に単位振幅の等分布リング状加振力が作用した場合の (r_0, z) なる位置に生じる地盤骨格の鉛直変位を表わす影響係数である。

式(2)は、図-3に示す分割モデルに対して次式のように離散化される。

$$\bar{u}_z^R(j) = \sum_{i=1}^n [\bar{G}_{ss}^R(j|i) \bar{q}_z^R(i)] R_i \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad \cdots (3)$$

ここに、 $\bar{u}_z^R(j)$ は j 要素の地盤骨格の変位、 $\bar{q}_z^R(i)$ は i 要素の地盤骨格に作用する等分布リング状加振力の振幅、 n は剛円筒部分のリング分割要素数、 R_i は i 要素の面積である。また、 $\bar{G}_{ss}^R(j|i)$ は i 要素に作用する単位振幅の等分布リング状加振力による j 要素の地盤骨格の変位を表す影響係数である。

ところで、半径 r_0 の円周上に等分布に作用する鉛直リング状加振力による受振点 r における地盤骨格の変位解を $G(r, r_0)$ とすれば、次式の関係式が得られる。

$$g(r, r_0) = \int_0^{r_0} G(r, \bar{r}) q(\bar{r}) d\bar{r} \quad \cdots (4)$$

ただし、 $g(r, r_0)$ は半径 r_0 の円形面上に作用する分布加振力による変位解、すなわち式(1)で与えられる地盤骨格の鉛直変位解である。また、 $q(\bar{r})$ は半径 $\bar{r}$ の円周上に作用する分布加振力の荷重振幅である。

式(4)より、 $G(r, r_0)$ は次式のようになる。

$$G(r, r_0) = \frac{1}{q(r_0)} \cdot \frac{\partial g(r, r_0)}{\partial r_0} \quad \cdots (5)$$

いま、式(1)で与えられる多孔質飽和弾性地盤内部の鉛直等分布加振力による地盤骨格の鉛直変位解を利用すれば、式(3)に見られる等分布リング状加振力による変位を表す影響係数は、次式のように得られる。

$$\bar{G}_{ss}^R(j|i) = -\frac{r_0^2}{4\mu} \int_0^\infty \frac{x U(x)}{\beta_3 \Theta F(x)} J_0^2(xr) dx \quad \cdots (6)$$

したがって、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リング状加振力 $\bar{q}_z^R(i)$ を未知とする連立一次方程式が得られる。また、得られた未知等分布加振力およびリング状加振力の合力がサクシオンアンカーに作用する加振力 Q_z 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。

3. サクシオンアンカーの変位応答

(1) アンカー変位の周波数応答

本節では、海底地盤条件として、Halpern・Christiano (1986) が用いた粗い飽和砂質土に対する諸弾性係数および密度等の数値を用いて、地盤の透水係数、スカート長およびアンカーの質量比の違いがサクシオンアンカーの

変位応答にどのような影響を及ぼすかについて検討する。ここでは、無次元加振振動数 $a_0(=\omega r_0/V_s)$ および無次元透水係数 $K_0(=kV_s/gr_0)$ の2つの無次元パラメータを設定して、サクシオンアンカー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、 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、地盤の透水係数として $k=10^{-1}\sim 10^{-5}$ m/s の範囲を考えているため、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。

図-4 は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ の場合について、スカート長 $L/r_0=2$ におけるサクシオンアンカーの変位を、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変位は小さくなっている。また、参考として $P_0=0.0$ 、すなわちサクシオンを0とした場合も合わせて示しておいた。サクシオンが作用しない場合には、円筒部分の全周面摩擦力がアンカーの引き抜き抵抗力となるため、サクシオンが作用する場合に比べて、大きな変位量となっていることがわかる。ところで、無次元透水係

数 $K_0=10.0, 0.001$ の2つの場合については、ここには示していないが、 K_0 が小さくなるにつれて、液体の粘性による減衰が大きくなるため、サクシオンアンカー変位は小さくなる傾向を示している。

図-5 は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ および $P_0=1.0$ において、スカート長 L/r_0 をパラメータにしてサクシオンアンカー変位を示したものである。この図より明らかに、サクシオンアンカーのスカート長が長くなれば円筒部分に作用する周面摩擦力が大きくなるため、サクシオンアンカー変位は小さくなっている。また、スカート長 $L/r_0=6, 10$ の場合には、両者はほぼ同じような変位挙動を示していることがわかる。これは、スカート長をあまり長くしてもサクシオンアンカーの変位量の減少が期待できない一種の『限界スカート長』が6~10付近に存在することを示しているものと推察される。

一方、図-6 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変位の周波数応答をアンカー支圧板の質量比 c をパラメータにして示したものである。なお、質量比 c および係留アンカーの変位振幅 A_z については、次式を用いる(高谷ら, 1993)。

$$c = \frac{m_p}{\rho r_0^3} \left\{ \frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - ca_0^2 f_1)^2 + (ca_0^2 f_2)^2} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_z = \frac{Q_z}{\mu r_0} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - ca_0^2 f_1)^2 + (ca_0^2 f_2)^2}}$$

ここに、 Q_z はサクシオンアンカーに作用する加振力の振幅、 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サクシオンアンカーの質量である。また、 f_1, f_2 は、それぞれ次式に示すサクシオンアンカーの変位 u_z を表す無次元係数項の実部および虚部である。

$$u_z = \frac{Q_z}{\mu r_0} (f_1 + if_2) \dots\dots\dots (8)$$

この図より、サクシオンアンカーの質量比 c が大きくなると共に、サクシオンアンカーの変位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とがわかる。これは、質量比 c が大きくなると、サ

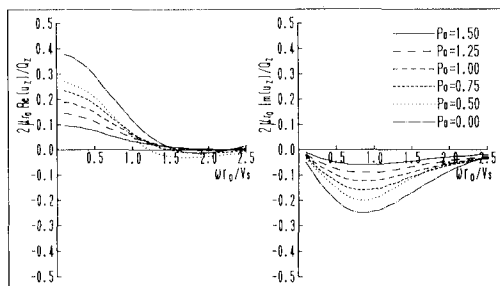


図-4 サクシオンアンカーの変位
($K_0=0.1, L/r_0=2$)

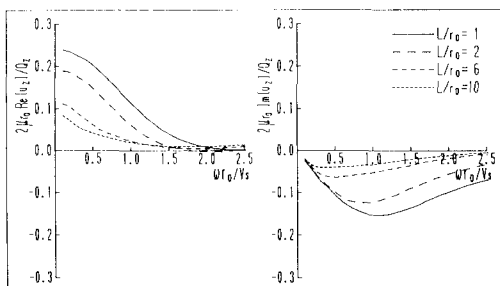


図-5 スカート長とアンカー変位の関係
($K_0=0.1, P_0=1.0$)

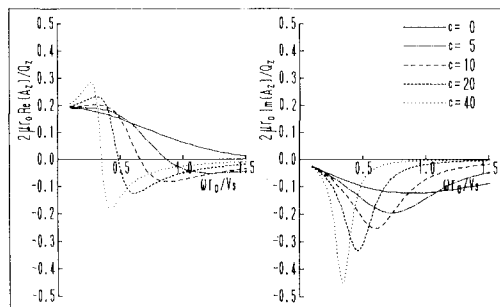


図-6 質量比とアンカー変位の関係
($K_0=0.1, L/r_0=2.0, P_0=1.0$)

クシオンアンカー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る。なお、図-4に示すサクシオンアンカー変位からも明らかなように、 P_0 が大きくなるにつれて、変位応答のピーク振動数は無次元加振振動数の高い方へ移動し、応答のピーク値は小さくなっている。また、無次元透水係数 $K_0=10.0$, 0.001 の場合との比較より、 K_0 が小さくなるにつれて、液体の粘性による減衰が大きくなるため、サクシオンアンカーの周波数応答のピーク値は小さくなっている。

したがって、サクシオンアンカーのスカート長を長くすれば、アンカー変位量は減少するが、サクシオンアンカーの質量比 c が大きくなるため、サクシオンアンカー

の変位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る。このため、最適なスカート長 L/r_0 が存在するものと思われる。

(2) 双錨泊された船舶の係留張力

本研究では、平石ら (1991) らが行った双錨泊された船舶の係留実験で得られた係留張力を用いてサクシオンアンカーの応答を解析する。

係留実験に用いた船舶は、現在沖縄定期航路に就航している「ぷりんせすおきなわ」(垂線間距離 120 m, 船幅 20 m, 吃水 5.34 m, 排水量 6264 ton) である。なお、係留実験では、この船舶を対象として 1/50 の縮尺で模型を製作している。また、チェーン長は 275 m, 避泊地の水深は

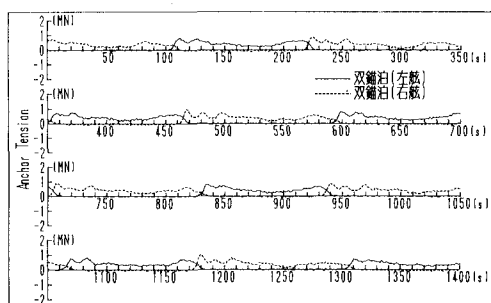


図-7 双錨泊時のチェーン張力の時間変動波形
(風速 50 m/s, 開き角 $\theta=30^\circ$)

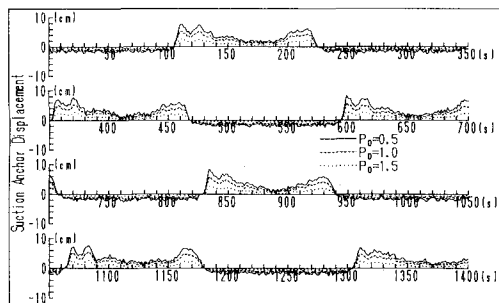


図-10 サクシオンアンカー変位の時刻歴応答
($K_0=0.1$, $L/r_0=6$, $c=10$)

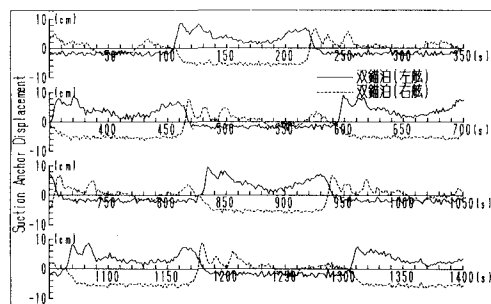


図-8 サクシオンアンカー変位の時刻歴応答
($K_0=0.1$, $L/r_0=2$, $P_0=1.0$, $r_0=1.5$ m)

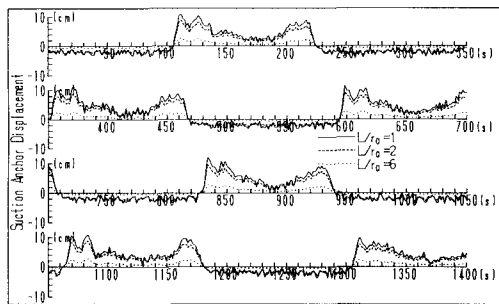


図-11 サクシオンアンカー変位の時刻歴応答
($K_0=0.1$, $c=10$, $P_0=1.0$)

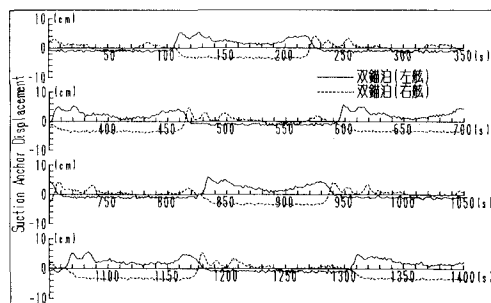


図-9 サクシオンアンカー変位の時刻歴応答
($K_0=0.1$, $L/r_0=6$, $P_0=1.0$, $r_0=1.5$ m)

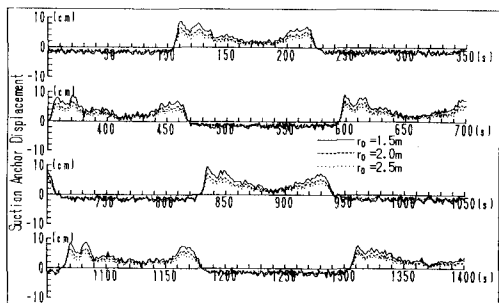


図-12 サクシオンアンカー変位の時刻歴応答
($K_0=0.1$, $L/r_0=2$, $c=10$, $P_0=1.0$)

15 m で一定としている。双錨泊では、2本の係留チェーンが作る開き角 θ を定義し、風向 α は開き角の2等分線からの傾き角として定義している。

図-7は、双錨泊における2本の係留チェーンの開き角 $\theta=30^\circ$ 、風向 $\alpha=0^\circ$ の場合について、風速 50 m/s において得られた左舷および右舷側のチェーン張力の時系列波形を示したものである。この図より、最大張力は昇降デッキを有している右舷側の方が左舷側に比べて最大張力が大きくなっている。また、左舷側に張力が作用している時には、右舷側の張力はほぼ0であり、反対に右舷側に張力が作用している時には、左舷側には張力が作用していないことがわかる。つまり、双錨泊においては同時に2本のチェーンが係留力を分担して受け持つわけではなく、船の側面が風上になった方の係留チェーンのみが船を係留していることを示している。

(3) サクシオンアンカーの時刻歴応答

図-8, 9は、それぞれスカート長 $L/r_0=2, 6$ におけるサクシオンアンカー変位の時刻歴応答を、図-7に示す双錨泊における左舷および右舷側張力を用いて、アンカーの質量比 $c=40$ の条件について示したものである。なお、アンカーの周波数応答は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、 $P_0=1.0$ のものを用いている。これらの図より明らかにように、スカート長 L/r_0 が長くなれば、アンカー変位が小さくなると共に、応答波形に見られる高振動数成分が減少していることがわかる。

一方、図-10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係数に対するサクシオンの比 P_0 をパラメータにしてサクシオンアンカー変位の時刻歴応答を図示したものである。なお、係留張力として、図-7に示す双錨泊における左舷側張力を用いている。周波数応答からも明らかにように、 P_0 が大きくなれば、サクシオンアンカー変位もかなり減少していることがわかる。また、図-11はサクシオンアンカーのスカート長 L/r_0 をパラメータにして、また、図-12は、サクシオンアンカーの半径 r_0 をパラメータにしてアンカー変位の時刻歴応答を図示したものである。これらの図より明らかにように、サクシオンアンカーのスカート長 L/r_0 が『限界スカート長』となる $L/r_0=6$ になれば、サクシオンアンカー変位はかなり減少していることがわかる。また、サクシオンアンカーの半径 r_0 が大きくなればアンカー変位は減少するが、スカート長 L/r_0 や P_0 に比べてサクシオンアンカー変位の減少にはあまり寄与しないことがわかる。

4. 結 論

本研究は、サクシオンアンカーを円筒状の構造物と考

えた解析手法を提案し、多点係留方式における係留アンカーとして、サクシオンアンカーの適用性を検討した。その結果、サクシオンアンカー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オンの大きさに強く存在し、またこれ以上サクシオンアンカーのスカート長を長くしてもサクシオンアンカーの変位の減少が期待できない一種の『限界スカート長』が $L/r_0=6\sim 10$ 付近に存在することがわかった。

なお、本研究では、2点係留実験において得られた張力に基づいて、多点係留方式へのサクシオンアンカーの適用を考えて、アンカー変位の応答特性について検討した。しかしながら、軟弱地盤への適用を考える場合には、サクシオンアンカー内部を含めた周辺地盤における応力や間隙水圧分布等に関する詳細な応答解析が必要であり、これについては今後の課題となろう。

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」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

- 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・前野賢彦・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・前野賢彦・平石哲也・高山知司 (1992): 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・前野賢彦・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.
- 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, No. 2, pp. 731-735.
- 平石哲也・高山知司 (1992): 多点係留ブイバースにおける係留張力と船舶の運動に関する模型実験, 港湾技研資料, 運輸省港湾技術研究所, No. 735, pp. 1-36.
- 前野賢彦・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, N. R. and Christiano, P. (1986): Response of poroelastic half-space to steady-state harmonic surface tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606-632.
- Senpere, D. and Auvergne, A. (1982): Suction anchor piles—A proven alternative to driving or drilling, Offshore Technical Conference, pp. 483-493.