

汚濁防止膜の重力式係留アンカーの応答特性

Response of Concrete Block Sinker for Mooring Silt Curtain

前野 賀彦*、高谷 富也**、村川 博***、川本 博文***
Yoshi-hiko Maeno, Tomiya Takatani, Hiroshi Murakawa
and Hirofumi Kawamoto

Concrete blocks are effectively used in soft seabed as a sinker for mooring silt curtain. Their holding power are estimated by cohesion between faces of bottom and sides of sinker and soft mud, difference between passive and active earth pressures, the submerged weight and the submerged overburden pressure. Concrete block shows often the higher holding power than estimated one. Because estimation does not include suction between faces of concrete block and mud bed. The effects of suction were investigated by simulating the response of sinker in soft bed under the storm wave and current measured in the field. The response of sinker in soft seabed greatly depends on the suction and the permeability of seabed.

Key words: Silt curtain, Sinker, Holding power, Suction

1. はじめに

近年、港湾整備や海面の埋立造成事業が沿岸域の開発に伴って盛んに行われている。これらの海洋工事に際しては、水産漁業への配慮もあり、従来より周辺海域の環境に対して十分配慮が行われている。その有力な汚濁防止策として、海洋工事汚濁防止膜が土捨て・埋立・浚渫工事が行われる海域に展開されている。この汚濁防止膜には、大別して固定式垂下型・自立型・浮沈式垂下型がある。何れの型にしても防止膜の係留が問題となる。これらの汚濁防止膜が海洋工事の終了と共に撤去されるものであることから、回収の比較的容易な重力式シンカーが係留に用いられてきた。垂下型の汚濁防止膜の係留には、コンクリート製ブロックの重力式係留アンカーが広く用いられている。汚濁防止膜が展開される海域では底質は軟弱なシルトであることが多く、その場合コンクリート製ブロックは地盤中に沈み込むことになる。過去における経験からこの種のアンカーの把駐効果については十分認められているところであるが、特に粘性土地盤においてはその威力を発揮している。この理由として把駐力の算定に際して把駐力が過小に評価されている可能性がある。前野ら(1994)は、自立型汚濁防止膜の係留に用いられているH型鋼アンカーが設計把駐力以上の把駐効果を有することの原因が主としてサクシジョンの効果であることを示している。その研究に基づけば、コンクリー

ト製ブロックについても粘性土地盤においてはブロックの底面においてサクシジョンによる把駐効果が期待される。従来のこの種のアンカーの設計に際しては、水平抵抗力は底面および側面の粘着力や受働土圧と主働土圧の差として、鉛直抵抗力は水中重量や水中土かぶり重量として評価されている。そこで、本研究では実際に現地観測された波と流れによる汚濁防止膜の係留索に作用する張力変動によるコンクリート製ブロックの重力式アンカーの応答特性を求めることにより、アンカーの把駐力におけるサクシジョンの効果を検討した。この場合、海底地盤に設置された重力式係留アンカーの周波数応答特性が必要となる。本研究では、海底地盤として、Biot(1956)により提案されている多孔質飽和弾性地盤を想定し、重力式アンカーの沈み込み深さをパラメータにして、アンカー側面の摩擦抵抗および底面に働くサクシジョンの違いが重力式アンカーの変位応答に及ぼす影響について周波数領域での検討を行った。次いで、これらの周波数領域での応答結果を踏まえて、垂下型汚濁防止膜の係留観測より得られた係留索張力を重力式アンカーに作用する外力として用いることにより、重力式アンカーの沈み込み深さ、摩擦抵抗力およびサクシジョンの違いが垂下型の汚濁防止膜の係留アンカーの応答特性に及ぼす影響について調べた。

2. 垂下型汚濁防止膜の係留索張力について

垂下型の海洋工事汚濁防止膜の係留索に作用する波・流れによる張力の測定は、1994年11月9日から12月13日までの約1ヶ月間にわたり、東京湾K地

* 正会員 日本大学短期大学部 建設学科
(〒274 千葉県船橋市習志野台7-1-24)
** 正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科
*** 正会員 海洋工事汚濁防止協会

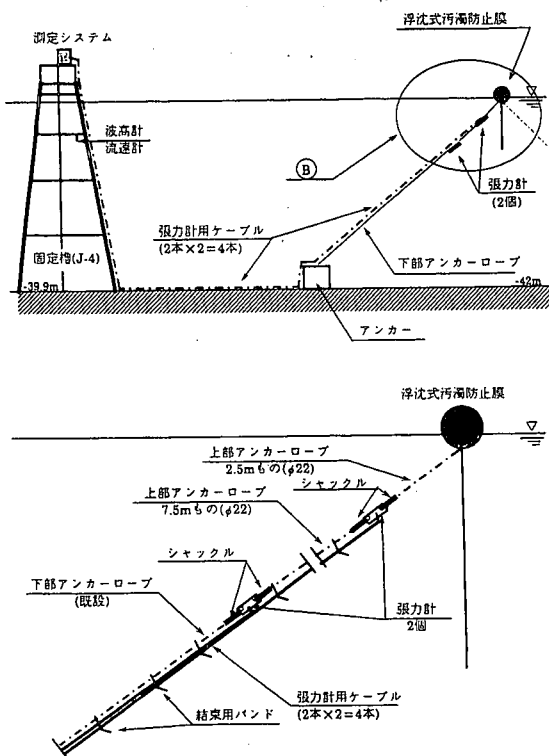


図-1 汚濁防止膜の係留索の概略

区の埋立工事海域に設置された海洋工事汚濁防止膜に対して行われた。

一般に、垂下型海洋工事汚濁防止膜のようなフレキシブルな構造物に作用する波・流れによる係留索張力や展張力などを計測する場合には、係留索張力のみならず、その作用する方向も重要な情報となる。

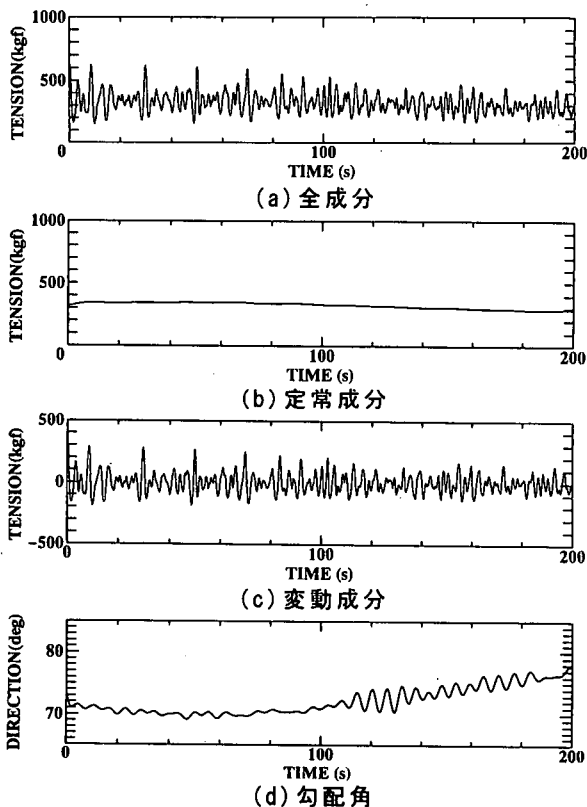


図-4 測定係留索張力（上部張力計）

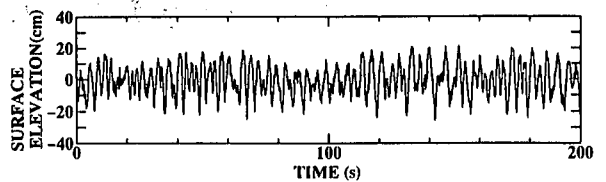


図-2 波浪観測データ

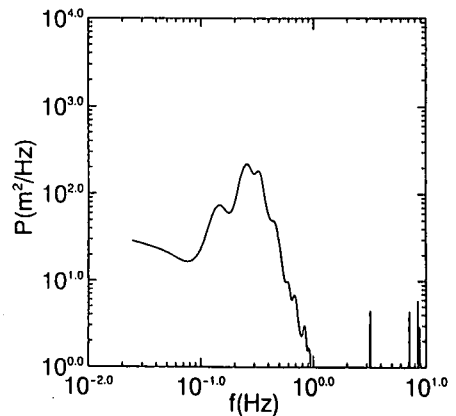


図-3 波浪観測データのパワースペクトル

このため、係留索張力と同時にその作用する方向も測定できる張力計を用いた。この張力計は、図-1に示すように上部および下部係留索の接続部2カ所にシャックルを用いて設置されている。また、張力の測定時の波浪および流れの状況を把握するために、観測地点に近接する固定槽に取り付けられた波高計と流速計により波高と流速を測定した。なお、計測現場の水深は約42mである。

図-2は、波浪観測データの一部を示したものである。また、張力測定時における波浪観測結果のパ

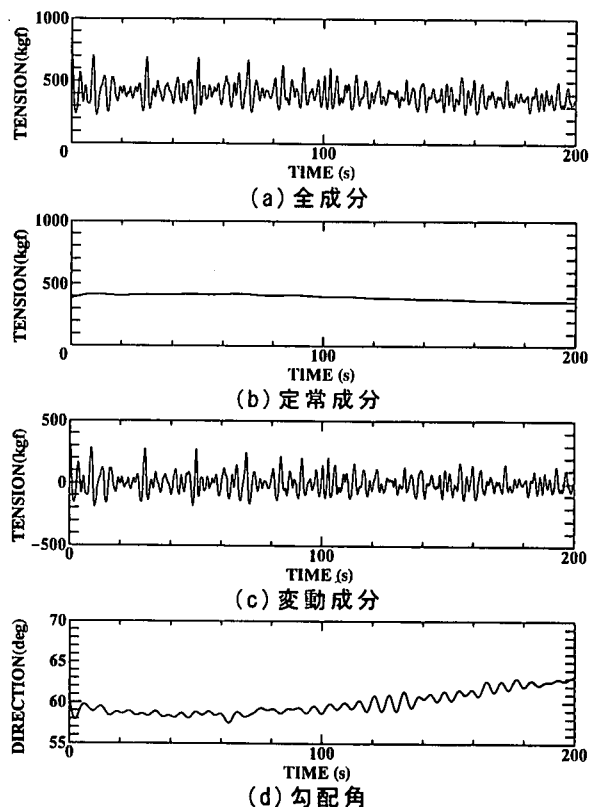


図-5 測定係留索張力（下部張力計）

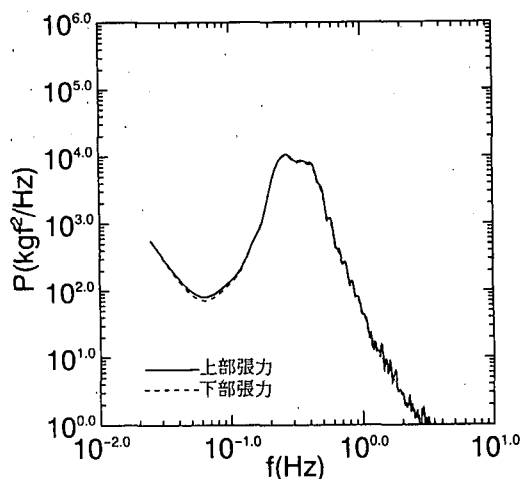


図-6 上部・下部の張力のパワースペクトルの比較

ワースペクトルを示したものが、図-3である。この図より、0.26Hzあたりにパワースペクトルのピークがあり、周期3.8sの波が卓越していることがわかる。

図-4、5は、それぞれ図-2に示す波浪観測データに対応した時刻における上部および下部張力計による測定データを示したものである。なお、同図中には、汚濁防止膜の係留索張力に見られる変動成分を検討するために、係留索張力において流れによる定常成分と波浪による変動成分に分離した張力およびその作用方向を示す勾配角の変動も併せて示しておいた。これらの図より、上部および下部張力計の両者ともに流れによる定常成分はあまり変動がなく、波浪による変動成分が顕著なものとなっている。また、上部および下部で測定された張力波形について、流れによる定常成分の違いが張力の最大値および最小値に影響しており、波浪による変動成分の波形は両者ともほぼ一致していることがわかる。また、上部および下部の両張力計により測定された張力のパワースペクトルを示した図-6の結果からもほぼ一致していることがわかる。

3. 重力式アンカーの応答特性について

本研究では、垂下型海洋工事汚濁防止膜の係留索張力を重力式アンカーに作用する外力として用いることにより、海底地盤の剛性や透水係数などの特性を考慮した汚濁防止膜の係留用アンカーとしてのコンクリート製ブロックの重力式アンカーの応答特性について調べる。また、海底地盤に設置される重力式アンカーの設置状態として、沈み込み深さをパラメータとしてアンカーの変位応答を検討する。さらに、重力式アンカーの底面に作用すると考えられるサクシンの有無が重力式アンカーの応答特性に及ぼす影響についても調べる。

(1) 重力式アンカーの周波数応答特性について

まず、重力式アンカーの周波数領域における応答特性として、コンクリート製ブロックの沈み込み深さ、地盤の透水係数、ブロック側面の摩擦抵抗およびブロック底面に作用するサクシンの違いがアンカーブロック変位に及ぼす影響について調べる。

いま、海底地盤に設置されたコンクリート製ブロックの重力式アンカーを図-7に示すように高さH、幅および奥行きWなる直方体にモデル化する。また、アンカーブロックの沈み込み量をDとする。

図-7に示された重力式アンカーのモデルについては、円形面上に作用する鉛直等分布加振力(高谷・北村, 1990)および円形面の円周上に作用する等分布リング状加振力(前野ら, 1993)による変位解を用いて、ブロックの側面および底面に作用する地盤反力を考慮する重力式アンカーの変位解析を行う。なお、コンクリート製ブロックの重力式アンカー変位の解析手法は、前野ら(1993)および高谷ら(1994)が行ったサクションアンカーの変位解析に対するものと同様に、ブロックの側面を有限個の同心リング要素に分割し、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リング状加振力による変位を重ね合わせる。これにより、各分割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ものである。なお、紙面の都合上、これらの詳細については前野ら(1993)の論文に譲る。

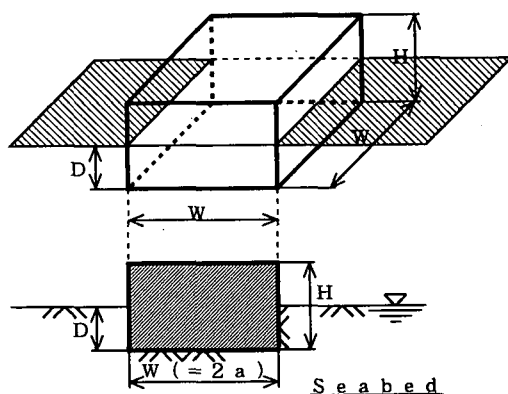


図-7 重力式アンカーの解析モデル

一方、海底地盤に対する諸弾性定数および密度等の数値として、Halpern・Christiano(1986)が用いた多孔質飽和地盤に対するものを流用する。また、多孔質飽和地盤に設置された重力式アンカーの応答解析については、無次元加振振動数 $a_0 (= \omega a / Vs)$ および無次元透水係数 $K_0 (= kVs / ga)$ の2つのパラメータを設定して、次式で示される変位 u_z の実部 f_1 および虚部 f_2 を用いて重力式アンカー変位の周波数応答を図示する。

$$u_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu a} (f_1 + i f_2) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 Q_z は重力式アンカーに作用する加振力の

振幅である。また、上記の無次元パラメータ中に見られる a はブロックの半幅 ($=W/2$)、 k は地盤の透水係数、 g は重力加速度、 ω は円振動数、 V_s は地盤の横波の伝播速度、 μ はせん断弾性係数である。また、無次元透水係数 K_0 については、実際の海底地盤の透水係数の範囲 $k=10^{-1} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ を考慮して、 $K_0=10 \sim 10^{-3}$ なる範囲の値に設定する。

図-8 は、無次元透水係数 $K_0=10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合において、ブロックの沈み込み深さ D/W をパラメータにして、アンカーブロック変位の周波数応答を図示したものである。なお、アンカーブロックは剛体とし、ブロック上面中央に周期的な引き揚げ加振力 Q_z が作用するものとして解析を

行っている。また、無次元加振振動数 $\omega a/V_s=0.05 \sim 1.25$ の範囲について図示している。この図より明らかなように、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、アンカーブロックの沈み込み深さ D/W が大きくなれば、ブロック側面に作用する摩擦抵抗力が大きくなるため、アンカーの変位は減少している。また、同じ沈み込み深さ D/W においては、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれて、アンカーブロックの変位が小さくなっていることがわかる。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。

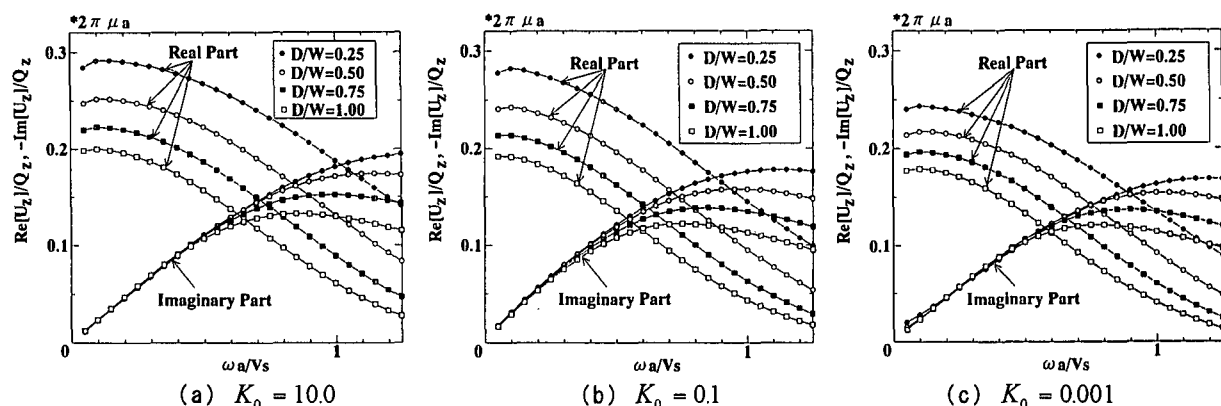


図-8 重力式アンカーの変位応答 ($P_0=1.0$)

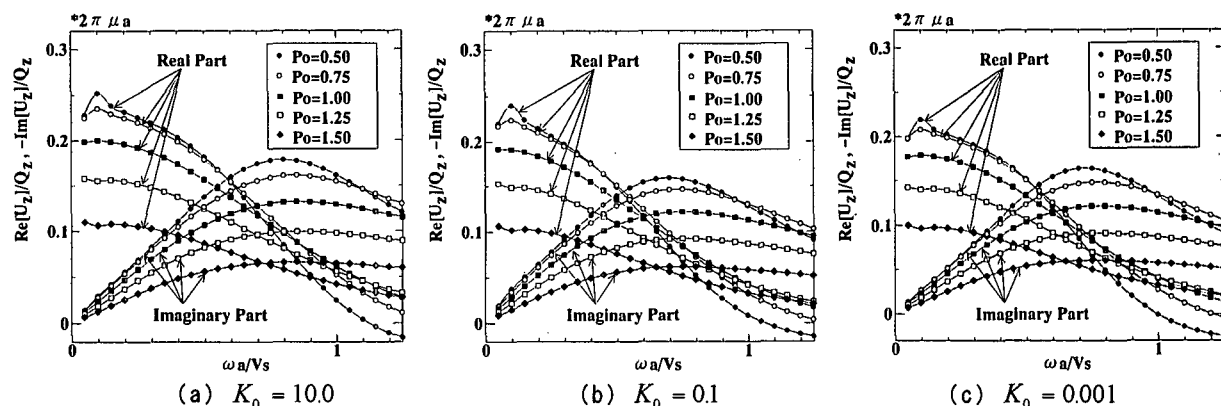


図-9 重力式アンカーの変位応答 ($D/W=1.00$)

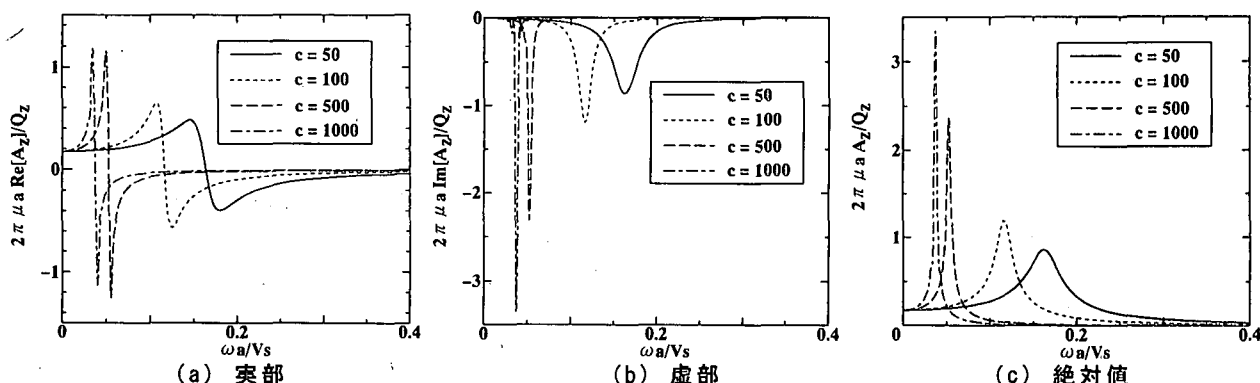


図-10 重力式アンカーの質量比と変位の関係 ($D/W=1.0, K_0=0.001, P_0=1.0$)

図-9は無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合において、アンカーブロックの沈み込み深さ $D/W = 1.00$ の場合について、ブロック底面に作用するサクシジョンの違いによる影響が重力式アンカー変位に及ぼす影響について示したものである。なお、サクシジョンの違いを表すパラメータとして、アンカーブロックに作用する全摩擦抵抗に対するサクシジョンの比 P_0 を用いている。この図より、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、サクシジョンの比 P_0 が大きくなるにつれてアンカーブロックの変位は小さくなっている。また、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれて、アンカー変位は小さくなる傾向を示していることがわかる。

一方、図-10は無次元透水係数 $K_0 = 0.001$ 、沈み込み深さ $D/W = 1.00$ およびサクシジョンの比 $P_0 = 1.0$ の場合について、アンカーブロックの質量比 c をパラメータにして重力式アンカー変位の周波数応答を示したものである。なお、質量比 c および重力式アンカーの変位振幅 Az は次式で表わされる(高谷ら, 1993)。

$$c = \frac{m_p}{\rho W^2 H} \dots\dots (2 \cdot a)$$

$$Az = \frac{Q_z}{2\pi\mu a} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - ca_0^2 f_1)^2 + (ca_0^2 f_2)^2}} \dots\dots (2 \cdot b)$$

ここに、 ρ は多孔質弾性地盤の密度、 m_p はアンカーブロックの質量である。

図-10より、アンカーブロックの質量比 c が大きくなるにつれて、重力式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、その応答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、アンカーブロック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。したがって、質量比 c が重力式アンカーの変位応答を左右することに注意を払う必要があるものと推察される。

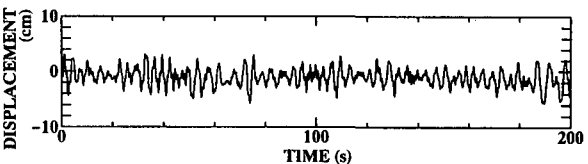
(2) 重力式アンカーの時刻歴応答特性について

ここでは、現場計測された垂下型汚濁防止膜の係留索張力を用いて、海底地盤の特性を考慮した重力式アンカーの応答特性を調べる。

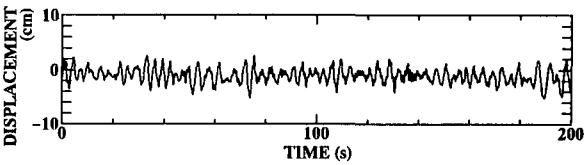
図-11は、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ 、サクシジョンの比 $P_0 = 1.0$ および質量比 $c = 500$ なる条件のもとで、下部張力計により測定された係留索張力を重力式アンカーの引き揚げ加振外力として用いた場合におけるアンカーの変位応答をアンカーブロックの沈み込み深さ D/W をパラメータにして図示したものである。なお、地盤の剛性に関する横波の伝播速度は $V_s = 150 \text{ m/s}$ としている。この図より明らかに、アンカーブロックの沈み込み深さ D/W が大きくなるにつれて、アンカーブロック側面に働く摩擦抵抗が増大するため、重力式アンカーの変

位応答は小さくなっていることがわかる。

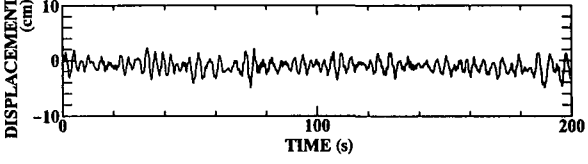
一方、図-12は、アンカーブロックの沈み込み深さ $D/W = 1.00$ 、無次元透水係数 $K_0 = 0.001$ および質量比 $c = 500$ なる条件のもとで、下部張力計による係留索張力に対する重力式アンカーの変位応答をサクシジョンの比 P_0 をパラメータにして示したものである。この図より、サクシジョンの比 P_0 が大きくなるにつれて、アンカーの変位応答が小さくなっていることがわかる。これは、重力式アンカー変位の



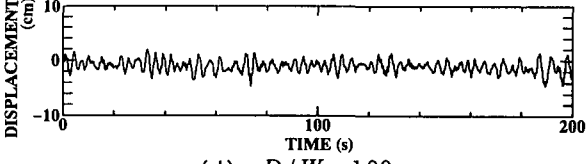
(a) $D/W = 0.25$



(b) $D/W = 0.50$

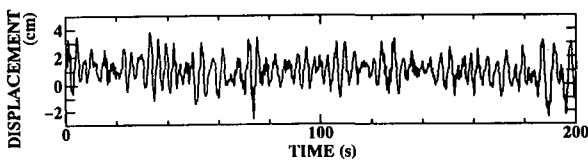


(c) $D/W = 0.75$

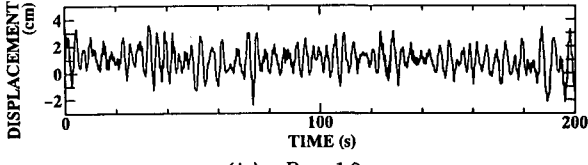


(d) $D/W = 1.00$

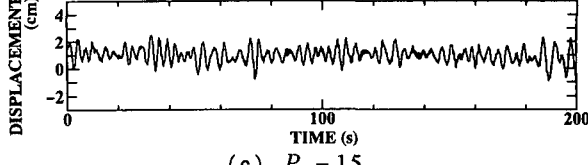
図-11 重力式アンカー変位の時刻歴応答
($D/W = 1.00, K_0 = 0.1, P_0 = 1.0, c = 500, V_s = 150 \text{ m/s}$)



(a) $P_0 = 0.5$



(b) $P_0 = 1.0$



(c) $P_0 = 1.5$

図-12 重力式アンカー変位の時刻歴応答
($D/W = 1.00, K_0 = 0.001, c = 500, V_s = 150 \text{ m/s}$)

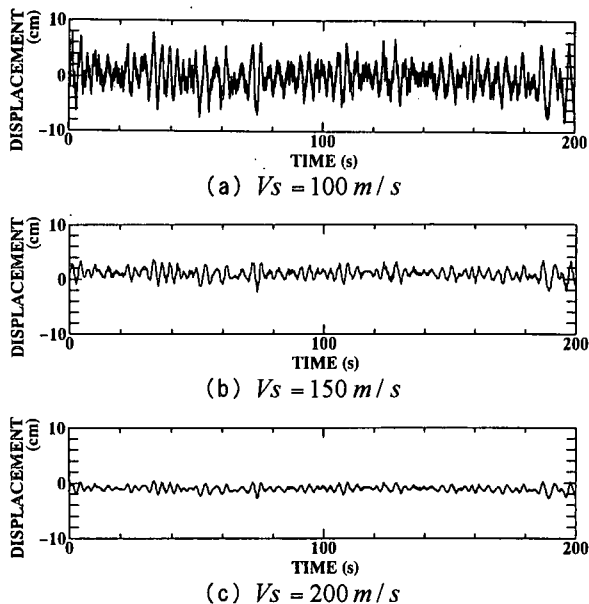


図-13 重力式アンカー変位の時刻歴応答
($D/W = 1.00$, $K_0 = 0.001$, $P_0 = 1.0$, $c = 500$)

周波数応答特性からも明らかなように、アンカーブロックの底面に作用するサクションが大きくなれば、重力式アンカーの変位応答は小さくなることを示唆している。

図-13は、アンカーブロックの沈み込み深さ $D/W = 1.00$ 、無次元透水係数 $K_0 = 0.001$ および質量比 $c = 500$ なる条件のもとで、アンカーブロックが設置される海底地盤の剛性、すなわち地盤の横波の伝播速度 V_s をパラメータにして重力式アンカーの変位応答を示したものである。一般に、横波の伝播速度 V_s が大きくなれば、アンカーの変位応答において重力式アンカーの周波数応答における低周波数領域での応答特性の影響が顕著なものとなって現れると考えられる。このため、横波の伝播速度 V_s が大きくなるにつれて、波浪による変動成分に対する変位も小さくなるため、重力式アンカーの変位応答は全体的に小さくなっていることがわかる。したがって、汚濁防止膜の係留用アンカーとして重力式アンカーを採用する海域のほとんどが粘性土地盤であることを考えれば、地盤の横波の伝播速度 V_s が小さくなるため、アンカー変位応答は大きくなるものと考えられる。しかしながら、ブロックの沈み込み深さおよび水深が確保される条件が整えば、ブロック底面に作用するサクションを期待することができるため、アンカー変位としては小さくなるものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、海洋工事汚濁防止膜の係留用アンカーとして用いられるコンクリート製ブロックの重力式アンカーの把駐力を検討するために、海底地盤の透水係数、アンカーブロックの沈み込み深さやブロック底面に作用するサクションの有無を考慮に入れた海底地盤に設置された重力式アンカーの周波数応答特性を求め、現地計測した汚濁防止膜の係留索張力を用いてアンカーブロックの応答特性を調べた。その結果、アンカーブロックの沈み込み深さやサクションが重力式アンカーに及ぼす影響は顕著なものとなり、沈み込み深さやサクション比が大きく、また地盤の透水係数が小さくなるにつれて、アンカー変位は小さくなる傾向を示した。また、重力式アンカーが設置されている海底地盤の剛性が大きくなるにつれて、重力式アンカー変位の周波数応答特性と係留索張力の有する振動数特性の影響を受けて係留アンカーの変位応答は小さくなることが明らかとなった。このため、汚濁防止膜の係留用アンカーとしてコンクリート製ブロックの重力式アンカーを用いる場合には、海底地盤の透水性を考慮に入れた地盤の剛性と係留索に作用する張力の振動数成分に注意を払う必要がある。

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)：サクショ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.
- 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.
- 前野賀彦・高谷 富也・西野好生・安井章雄(1994)：海洋工事汚濁防止膜の係留アンカーに関する一考察、海洋開発論文集、Vol. 10、pp. 325-330.
- 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.