

海洋工事汚濁防止膜の係留アンカーに関する一考察 A Consideration on Anchorage of Pollution Control Fence

前野 賀彦*、高谷 富也**、西野 好生***、安井 章雄***
Yoshi-hiko.Maeno,Tomiya.Takatani,Yoshio.Nishino and Akio.Yasui

The completion of development of the pollution control fence needs its perfect recovery with safety. The gravity-type sinker is popular for the floating silt curtain. Because of its handling and cost performance, the H-section steel is widely used for anchoring the floating silt curtain. It is known that H-section steel anchor has enough holding power in comparison with its weight. The response of H-section steel anchor under the mooring force acting through the wire is investigated in this paper. The numerical evaluation of H-section steel anchor response employs the fluctuating tension measured in the field. The H-section steel anchor has the suction in addition to the gravity. The effect of the suction on the anchor response is also numerically investigated.

Key words: Pollution Control Fence, H-section Steel Anchor, Suction, Mooring Force

1. はじめに

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。しかしながら、膜の展開が長期間に及ぶ場合にはシンカーのフックが腐食することによりその回収が困難になる場合も想定される。シンカーが放置されると、後日の工事や水産漁業に支障をきたすことが想定される場合には他の係留方式が選択される。特に、自立式汚濁防止膜の係留に際して、様々なアンカー形式の中で、経済性・施工性の上からH型钢アンカーが経験に基づいて用いられてきた。過去の施工例は、この種のアンカーの優越性を示している。そこで、本研究ではH型钢アンカーの把駐力の検討のために、実際に現地計測した係留索張力を用いてH型钢アンカーの応答特性を検討した。この場合、海底地盤に設置されたH型钢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、この多孔質飽和地盤に設置されたH型钢アンカーの周波数応答について、海底地盤の透水

係数やH型钢に作用するサクションの有無がどのような影響を及ぼすかについて検討したものである。

2. 汚濁防止膜の係留索張力について

自立式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、1993年10月1日から10月7日までの7日間にわたり、千葉県検見川沖3kmに位置する土捨て場に設置された汚濁防止膜に対して行われた。

一般に、外力による変位のみならず、構造物自体が変形を引き起こす自立式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。

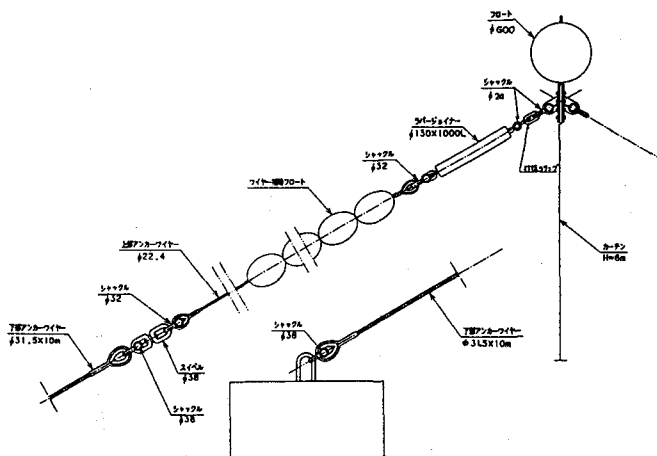


図-1 汚濁防止膜の係留索の概略

* 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

このため、張力と同時にその作用する方向も測定できる張力計を新たに開発した。この張力計は、図-1に示す係留索のワイヤー補助フロートとワイヤーとのシャックルによる継目（上部）と係留索とシンカーのフックとのシャックルによる継目（下部）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、張力計を設置した係留索を接続したシンカーの上に超音波式と圧力式の波高計と直行する2成分の流速を測定する流速計が組み込まれたウェーブハンターを設置した。なお、計測現場の水深は約12mである。

1993年10月1日から10月7日までの7日間にわたる汚濁防止膜の係留索張力の現地測定の全期間において、張力計を設置した係留索を接続したシンカーに固定されたウェーブハンターにより測定された波浪について、ゼロアップクロス法による波別解析を行った。その結果、有義波高の低い範囲では、有義波周期が幅広く分布しているが、南西の風によるうねりが加わった場合には、有義波周期の増大に伴い有義波高が増加する傾向が見られた。また、全観測期間における有義波高は0.6mであったが、張力測定期間の有義波高は0.2m程度であった。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

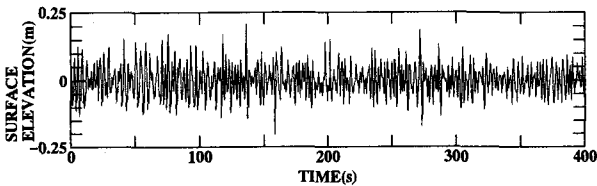


図-2 波浪観測データ

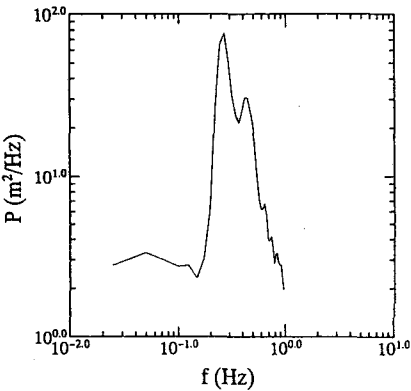
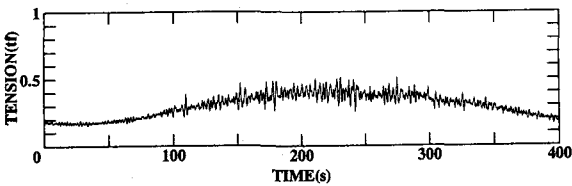
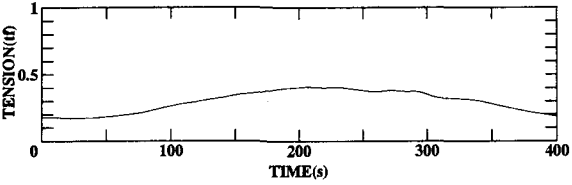


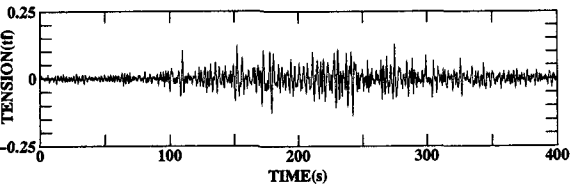
図-3 波浪観測データのパワースペクトル



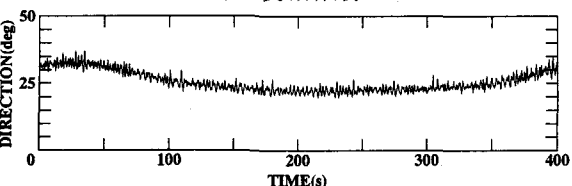
(a) 全成分



(b) 定常成分

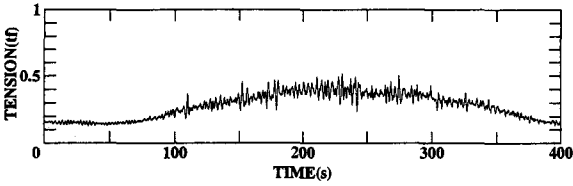


(c) 変動成分

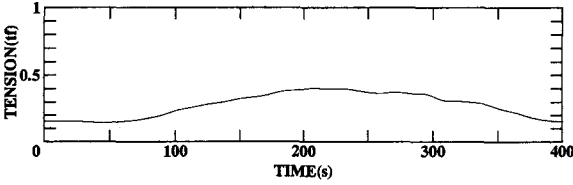


(d) 勾配角

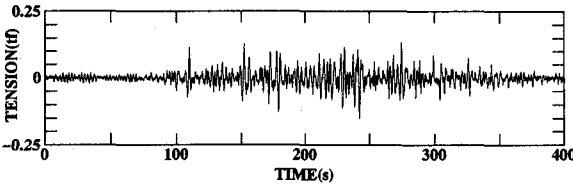
図-4 測定係留索張力（上部張力計）



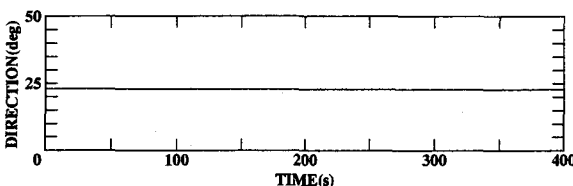
(a) 全成分



(b) 定常成分



(c) 変動成分

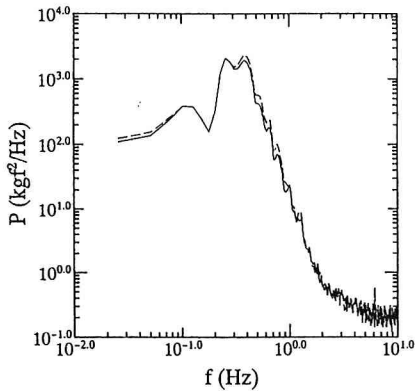


(d) 勾配角

図-5 測定係留索張力（下部張力計）

表－１ 係留索張力の各成分の最大・最小値

	上部張力計		下部張力計	
	最大値	最小値	最大値	最小値
全成分 (tf)	0.516	0.151	0.520	0.129
定常成分 (tf)	0.409	0.173	0.405	0.144
変動成分 (tf)	0.129	-0.138	0.136	-0.151
勾配角 (度)	37.8	19.9	23.4	22.5



図－６ 上部・下部の張力のパワースペクトルの比較

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。また、図－４、５に示す上部および下部の張力計により測定された係留索張力の各成分の最大値および最小値を示したものが表－１である。図－４、５および表－１より、上部および下部で測定された張力波形および最大・最小値はほぼ一致している。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。このため、係留索のカテナリーを問題にする場合を除いて、係留索の上部において張力測定を行っても支障が無いものと言えよう。

また、図－４に示した上部張力計で測定された張力の勾配角の変動も、張力の変動と同様に流れによる定常成分の上に波浪による変動成分が加わったものとなっているのに対して、下部の張力計で測定された張力の勾配角の変動は約23度ではほぼ一定となっている。これは、下部のワイヤーとシンカーのフックの間に固定された張力計がシャックル等でブロックされて係留索の勾配角の測定に支障をきたしたためである。このため、シンカーのフックとワイヤーの間に張力計を設置する際には注意を要する。

3. H型鋼アンカーの応答特性について

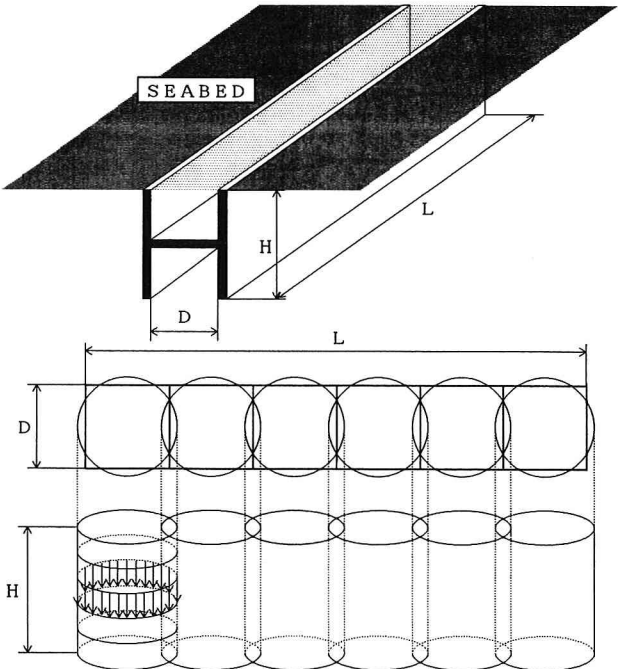
本研究では、自立式海洋工事汚濁防止膜の係留索張力をH型鋼アンカーに作用する外力として用いることにより、海底地盤の剛性や透水係数などの特性を考慮

した汚濁防止膜の係留用アンカーとしてのH型鋼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H型鋼アンカーの設置状態として、半分埋設された状態と完全に海底地盤内部に埋設された状態の2つの場合についてのH型鋼アンカーの応答を比較検討する。さらに、H型鋼アンカーのウェブ面に作用すると考えられるサクシジョンの有無がアンカーの応答特性に及ぼす影響についても調べる。

(1) H型鋼アンカーの周波数応答特性について

まず、H型鋼アンカーの周波数応答特性を求める。ここでは、H型鋼アンカーの埋設深さ、透水係数およびサクシジョンの違いがアンカー変位に及ぼす影響について調べる。

いま、海底地盤に埋設されたH型鋼アンカーを図－７に示すようにモデル化する。すなわち、H型鋼のフランジ面と海底地盤との摩擦およびH型鋼のウェブ面に作用するサクシジョンを考慮するために、H型鋼の長さ方向をいくつか分割する。また、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のみ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、H型鋼のフランジ面に作用する地盤反力を考慮するH型鋼アンカーの変位解析を行う。なお、H型鋼アンカー変位の解析手法は、前野ら(1993)が行ったサクシジョンアンカーの変位解析に対するものと同様に、H型鋼のフランジ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。なお、紙面の都合上、これらの詳細については



図－７ H型鋼アンカーの解析モデル

前野ら(1993)の論文に譲る。

多孔質飽和地盤の諸弾性定数および密度等の数値として、Halpern・Christiano(1986)が用いた飽和砂質土に対するものを用いている。また、無次元加振振動数 $d_0 (= \omega D / Vs)$ および無次元透水係数 $Ko (= kVs / gr_0)$ 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 の絶対値 $\sqrt{f_1^2 + f_2^2}$ を用いてH型鋼アンカー変位の周波数応答を図示する。

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

ここに、 Q_z はH型鋼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 D はH型鋼のウェブ高さ、 k は地盤の透水係数、 g は重力加速度、 ω は円振動数、 Vs 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 Ko 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、 $Ko = 10 \sim 10^{-3}$ なる範囲の値に設定する。

図-8は、H型鋼アンカーの埋設深さ $H/D = 0.5$ について、無次元透水係数 $Ko = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合におけるH型鋼アンカー変位の周波数応答を、H型鋼フランジ面に作用する全周面摩擦力に対するサク

ションの比 Po をパラメータにして図示したものである。なお、この Po が大きくなることはサクションが大きくなることを意味している。また、無次元加振振動数 $\omega D / Vs = 0.05 \sim 0.5$ の範囲について示している。この図より明らかなように、いずれの無次元透水係数 Ko においても、無次元加振振動数 $\omega D / Vs = 0.4$ 付近では顕著な変動が見られるものの、サクションの比 Po が大きくなるにつれてH型鋼アンカー変位は小さくなっている。また、無次元透水係数 Ko 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。これは、 Ko 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ためである。

図-9は、H型鋼アンカーが完全に海底地盤内部に埋設された状態(埋設深さ $H/D = 1.0$)について、無次元透水係数 $Ko = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合におけるアンカー変位の周波数応答を、サクションの比 Po をパラメータにして図示したものである。この図より、H型鋼アンカーが完全に海底地盤内部に埋設されるために、H型鋼のフランジ部分に作用する周面摩擦力が大きくなるためにアンカー変位は $H/D = 0.5$ の場合に比べて多少小さくなっているが、アンカーの埋設深さが地盤表面付近であるためにH型鋼のフランジ面に作

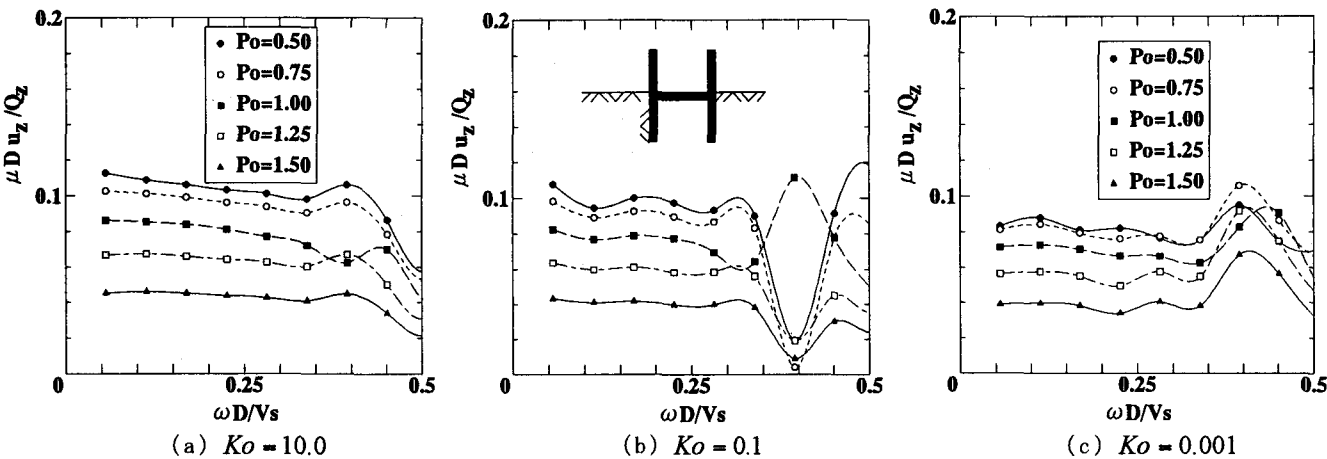


図-8 H型鋼アンカーの変位応答 ($H/D = 0.5$)

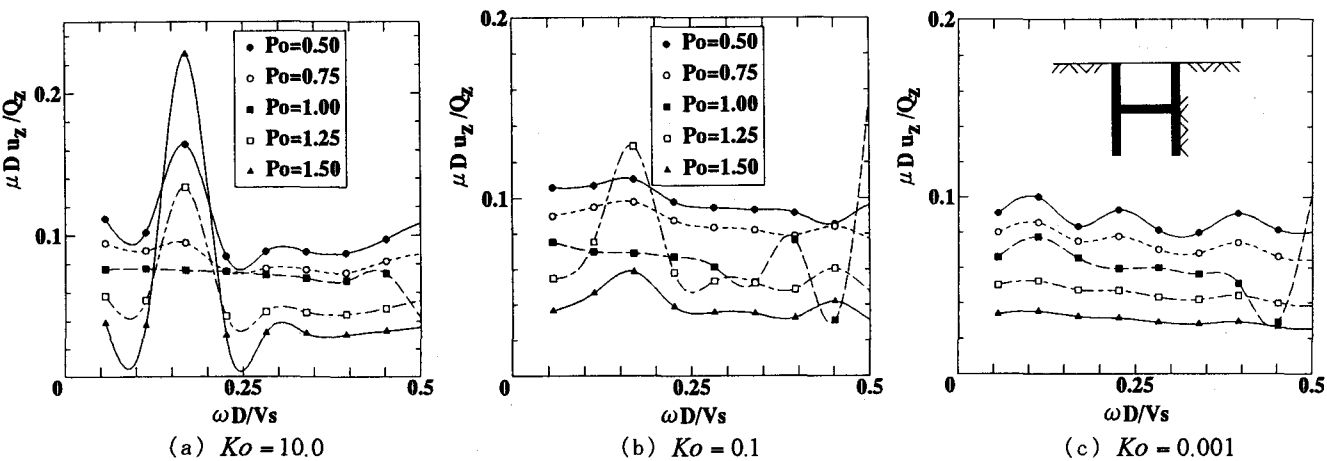


図-9 H型鋼アンカーの変位応答 ($H/D = 1.0$)

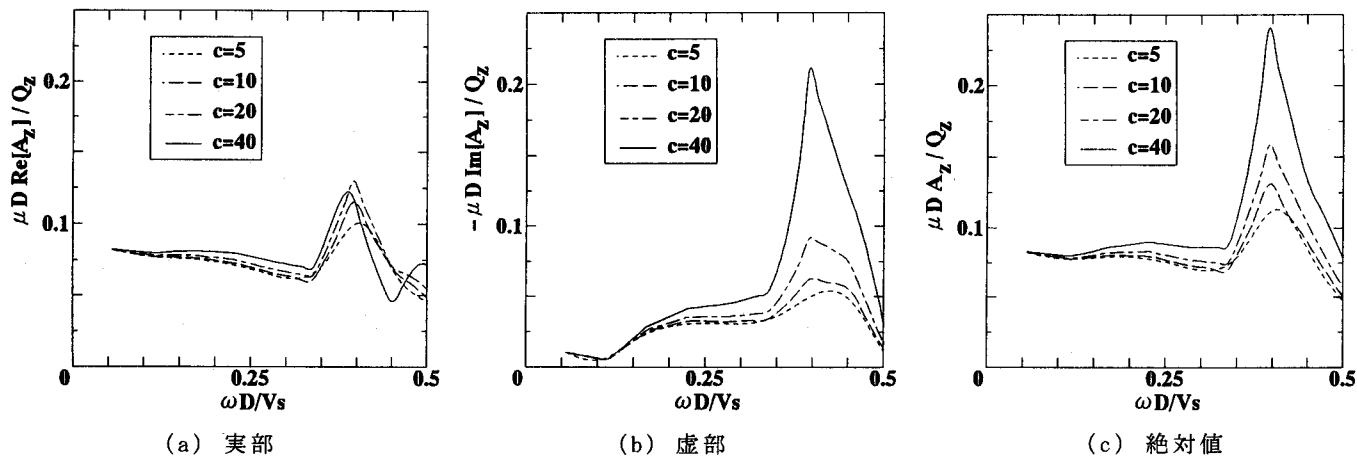


図-10 H型鋼アンカーの質量比と変位の関係 ($H/D=0.5$, $Ko=0.1$, $Po=1.0$)

用する周面摩擦力はアンカー変位にあまり影響していないことがわかる。また、無次元透水係数 $Ko=10.0$ においては、サクシヨンの比 Po が大きくなるにつれて無次元加振振動数 $\omega D/Vs=0.17$ 付近においてピークが見られる。この現象は、 Ko が小さくなれば現れないことより、液体の粘性による減衰とサクシヨンの比 Po の相互効果によるものと考えられる。

一方、図-10は無次元透水係数 $Ko=0.1$ 、埋設深さ $H/D=0.5$ およびサクシヨンの比 $Po=1.0$ の場合について、H型鋼の質量比 c をパラメータにしてH型鋼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H型鋼アンカーの変位振幅 A_z は次式で表わされる(高谷ら, 1993)。

$$c = \frac{m_p}{\rho A_H L} \quad \dots\dots (2 \cdot a)$$

$$A_z = \frac{Q_z}{\mu D} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - cd_0^2 f_1^2)^2 + (cd_0^2 f_2^2)^2}} \quad \dots\dots (2 \cdot b)$$

ここに、 ρ は多孔質弾性地盤の密度、 A_H 、 L および m_p はそれぞれH型鋼アンカーの断面積、長さおよび質量である。

図-10より、H型鋼の質量比 c が大きくなるにつれて、H型鋼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 が大きくなるとき、H型鋼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。したがって、質量比 c がH型鋼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) H型鋼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H型鋼アンカーの応答特性を調べる。

図-11は、H型鋼アンカーが完全に海底地盤内部に埋設された場合(埋設深さ $H/D=0.5$) について、無次

元透水係数 $Ko=0.1$ 、サクシヨンの比 $Po=1.0$ および質量比 $c=20$ 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H型鋼アンカーの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 $Vs=200 \text{ m/s}$ としている。また、同図には係留索張力に含まれる流れによる定常成分と波浪による変動成分に対するアンカーの変位応答を併せて示しておいた。この図より明らかなように、H型鋼アンカーの変位応答においては、流れによる定常成分と波浪による変動成分に対する影響が顕著なものとなって現れており、流れによる定常成分による変位応答が支配的なものとなっていることがわかる。

図-12は、H型鋼アンカーの埋設深さ $H/D=1.0$ 、無次元透水係数 $Ko=0.1$ および質量比 $c=20$ なる条件

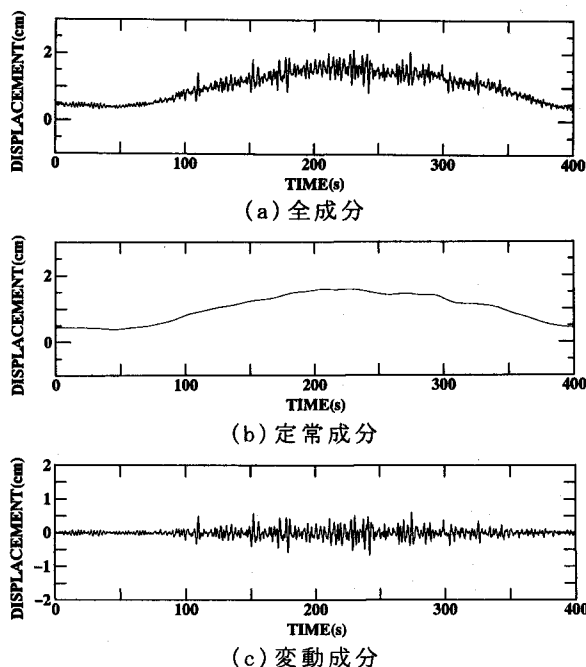


図-11 H型鋼アンカー変位の時刻歴応答 ($H/D=0.5$, $Ko=0.1$, $Po=1.0$, $c=20$, $Vs=200 \text{ m/s}$)

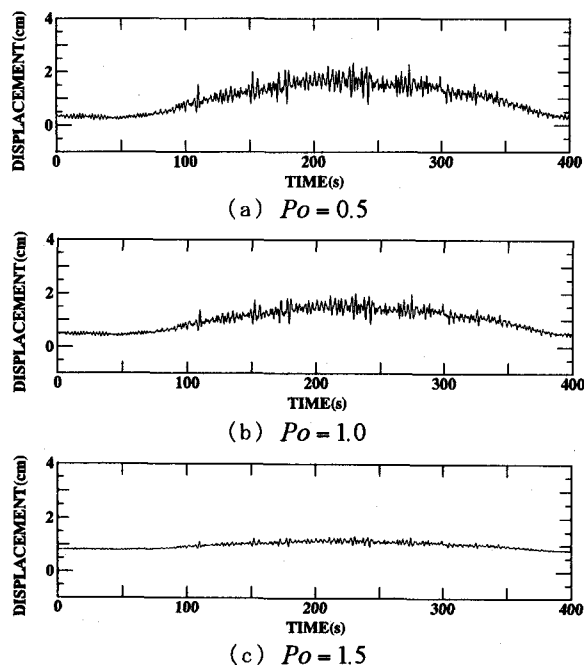


図-12 H型鋼アンカー変位の時刻歴応答
($H/D=1.0$, $Ko=0.1$, $c=20$, $Vs=200\text{ m/s}$)

のもとで、下部張力計による係留索張力に対するH型鋼アンカーの変位応答をサクシジョンの比 Po 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 Po が大きくなるにつれて、流れによる定常成分と波浪による変動成分に対する変位応答が小さくなり、全成分に対する変位応答値としては小さくなっていることがわかる。これは、H型鋼アンカー変位の周波数応答特性からも明らかのように、H型鋼のウェブ面に作用するサクシジョンが大きくなれば、H型鋼アンカー変位は小さくなることを示唆している。

一方、図-13はアンカーの埋設深さ $H/D=1.0$ 、無次元透水係数 $Ko=0.001$ および質量比 $c=20$ なる条件のもとで、アンカー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 Vs をパラメータにしてH型鋼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 Vs が大きくなれば、アンカーの変位応答においてH型鋼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、係留索張力に含まれる流れによる定常成分に対するH型鋼アンカー変位がかなり小さくなるとともに、波浪による変動成分に対する変位も小さくなるため、H型鋼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。

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H型鋼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やH型鋼のウェブ面に作用するサクシジョンの有無を考慮に入れた海底地盤に設置

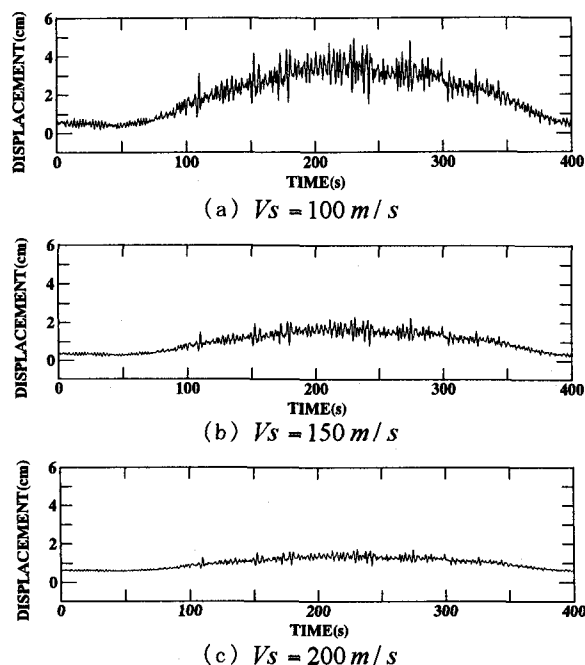


図-13 H型鋼アンカー変位の時刻歴応答
($H/D=1.0$, $Ko=0.001$, $Po=1.0$, $c=20$)

されたH型鋼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H型鋼アンカーの応答特性を調べた。その結果、サクシジョンがH型鋼アンカーに及ぼす影響は顕著なものとなり、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す。また、H型鋼アンカーが埋設されている海底地盤の剛性が大きくなるにつれて、H型鋼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H型鋼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H型鋼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流れと波浪による定常成分および変動成分張力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.
- 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 Poroelastic Half-Space to Steady-State Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol.10, pp.606-632.