

汚濁防止膜の各種係留アンカーの実測張力による変位応答特性

前野 賀彦*・高谷 富也**・西野 好生***・安井 章雄***

1. 序 論

首都圏や近畿圏の大都市のみならず地方都市においても都市機能の充実発展のためには、沿岸部の開発が求められる。そこで、多くの都市沿岸部において、物流基地としての港湾・空港整備は言うには及ばず、国民の余暇の増大に伴う海洋性リレーション施設の展開や情報化時代に対応したビジネス空間の創造が進められている。それらの整備事業は多くの場合、埋立・浚渫を含む海洋工事を伴っており、その遂行に当たって周辺環境の保全は当然考慮されるべき重要な課題である。そこで、海洋工事に際して汚濁防止膜が波・流れ等の海象条件を考慮して工事海域に展開される。これらの汚濁防止膜は、工事終了と共に撤去されるべきものであることから、それらの係留システムは恒久的なものではなく、容易に移動・回収が可能なものである必要がある。また、事業の進捗に伴う工事海域の拡大に際して係留システムが残留し、工事に支障を来すことがないことも重要な条件である。これらのことから、従来、汚濁防止膜の係留に際して比較的回収が容易なシンカーが用いられてきた。特に、万が一の回収不能による被害を回避するために土嚢を用いたシンカーも用いられているが、普通はコンクリート方塊が用いられている。他に自立式汚濁防止膜では、H型鋼を用いたシンカーが適用され、その把駐効果が経験的に肯定されている。前野ら（1994）は現地計測した係留索張力を用いて周波数応答特性を検討した結果、H型鋼アンカーの把駐力へのサクシンの効果を示した。また、前野ら（1993）は施工・回収が容易なサクションアンカーの適用を考え、アンカーおよびその周辺地盤の応答を報告している。今後、汚濁防止膜がより海象条件の厳しい海域にも展開されることから、実際に暴風下で現地測定された浮沈式垂下型汚濁防止膜の係留索に作用する張力を用いて、波・流れによる汚濁防止膜の各種係留アンカーの応答特性を明らかにした。

2. 暴浪時の汚濁防止膜の係留索張力

汚濁防止膜の設計条件を越える暴浪下における耐波安定性が必ずしも明確でないため、そのような条件のもとでは、通常、浮沈式にあっては水面下に沈められ、固定式については撤去が検討される。このようなことから、暴浪下における汚濁防止膜の応答、中でも係留索張力の測定の必要性が指摘された。そこで、暴風波浪下の汚濁防止膜の係留索張力の現地観測結果について以下に説明する。

垂下型の汚濁防止膜の係留索張力の測定は、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地区の埋め立て工事海域において行われた。図-1は測定地点付近の平面図を、また図-2は図-1の測定地点のA-A断面の詳細を示したものである。水深約42mのアンカーと汚濁防止膜を連結する係留索の上部および下部における接続部にシャックルで取り付けられた張力計により係留索張力を測定した。また、張力測定と同時に測定地点に近接する固定槽において波高および流速の測定を行った。

図-3は、暴風波浪時に測定された垂下型汚濁防止膜の係留索の下部における張力の時刻歴変動を示したものの

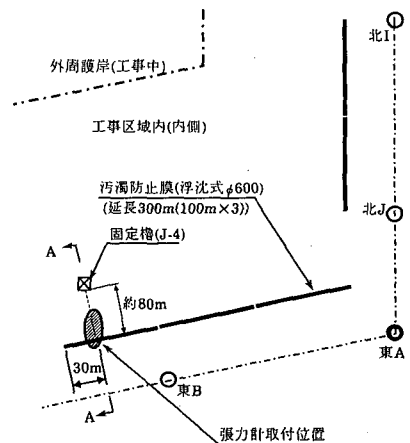


図-1 係留索張力の測定地点平面図

* 正会員 農博 日本大学短期大学部教授 建設学科
 ** 正会員 学博 舞鶴工業高等専門学校助教授 建設システム工学科
 *** 正会員 海洋工事汚濁防止協会

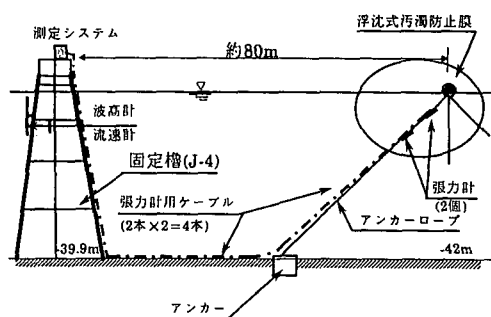


図-2 測定地点の概略 (A-A 断面)

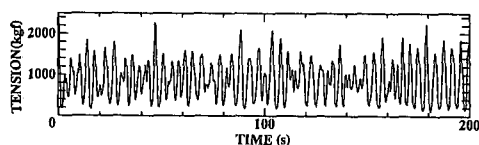


図-3 係留索張力の時刻歴変動 (下部張力)

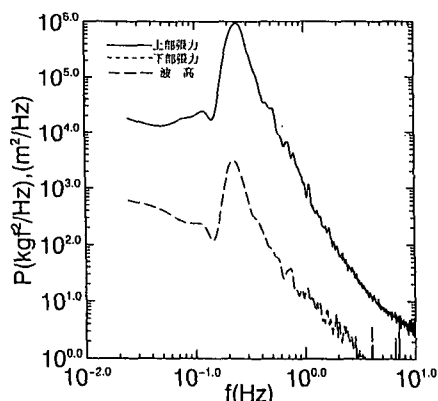


図-4 上部・下部張力、波浪のパワースペクトル

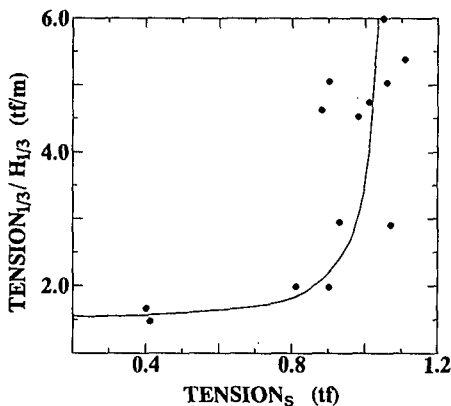


図-5 変動張力の発達特性

である。なお、全測定期間における最大有義波高は 1.02 m で、汚濁防止膜直角方向 (x 方向) および膜平行方向 (y 方向) の最大平均流速はそれぞれ 0.52 m/s および 0.36 m/s であった。一方、図-4 は係留索張力の測定時における波浪スペクトルおよび上部・下部の張力のパワースペクトルを示したものである。それによれば上部および下部の係留索張力は波浪スペクトルの有する振動数特性の影響を受けているおり、両係留索張力が有する振動数成分はほぼ同じであり、張力の最大値・最小値もほぼ同じものとなっている。以下の係留アンカーの変位応答解析においては、下部張力計による値を係留外力として用いた。

これらの波・流れ作用下の張力発達特性については、主に流れによる静的張力の発達に伴い波による変動張力の発達割合が増すことが前野ら (1994) により示唆されている。今回は大きな流れの作用を受ける場合について係留アンカーの応答特性を検討することから、静的張力レベルの相違による変動張力の発達特性について改めて検討する。そこで、静的張力 $TENSION_S$ とその測定期間中の有義波高 $H_{1/3}$ で除した有義張力 $TENSION_{1/3}$ との関係を図-5 に示した。有義張力は波による変動張力成分について有義波と同様の定義により求められる。それによれば、静的張力が増加するに従い有義波高で除した有義張力が急激に増加しており、波に対する張力の発達割合が増加していることが認められる。つまり、流れによる張力の発達レベルが高い場合には、波により大きな衝撃張力が発生することが認められる。

3. 汚濁防止膜の係留アンカーの応答特性

汚濁防止膜の係留アンカーとして求められる条件としては、膜が海洋工事の展開に伴って供用されることから、設置・撤去が容易である等の施工性の良さと経済的であ

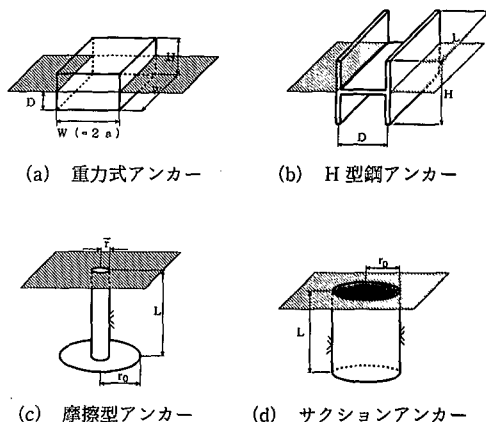


図-6 各種アンカーモデルの概要

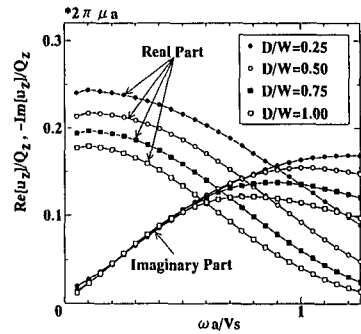
ることである。このようなことから、1.にも述べたとおり自立型の汚濁防止膜については、経験的に高い把駐力が期待されるH型鋼アンカーが従来用いられてきた。この種のアンカーについては、前野ら（1994）が解析モデルを示し把駐力へのサクシジョンの効果を示している。また、垂下型の汚濁防止膜については、コンクリート製ブロックの重力式アンカーが用いられている。この種のアンカーについても、前野ら（1995）が解析モデルを示すと共にアンカーの沈み込みの効果を検討した。その一方で、浮体構造物の軟弱地盤上における係留法として、高谷ら（1991）は支圧型アンカーの適用性の検討を行っており、前野ら（1993）は大気圧を遮断することによりサクシジョンを把駐力に取り込むサクシジョンアンカーのモデルを提案している。さらに、高谷ら（1994）は支圧型アンカーの杭側面の摩擦抵抗を考慮し一般化した摩擦型アンカーについてもモデルを提案している。

そこで、これら各種アンカーの得失と汚濁防止膜の係留アンカーとしての適応性を検討した。図-6に各種アンカーモデルの概略図を示す。これより、コンクリート製ブロックの重力式アンカーはブロック側面の摩擦抵抗力および底面のサクシジョンを考慮できるモデルとしている。H型鋼アンカーについても、H型鋼ウェブ面とフランジ部分に囲まれる領域に作用すると考えられるサクシジョンおよびフランジ面の摩擦抵抗力を考慮できるモデルとしている。また、摩擦型アンカーは、支圧板をアンカーロッドの下端部に有するモデルとなっており、ロッド部分に作用する摩擦抵抗力を考慮できるものとなっている。サクシジョンアンカーは、上端部分が閉じられた中空の円筒からなるモデルとし、アンカー上端部分にサクシジョンが作用するものとしている。また、円筒部分に作用する摩擦抵抗力を考慮できるモデルとなっている。

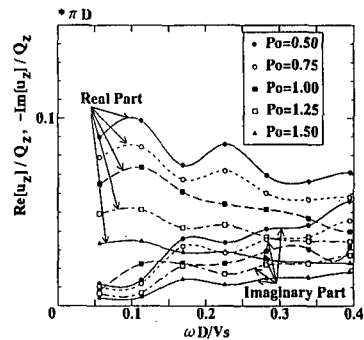
(1) アンカー変位の周波数応答

海底地盤として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(Biot, 1956)を想定し、この地盤上および内部に設置された係留アンカーに展張力が作用した場合の応答特性より係留アンカーの把駐力を検討した。地盤条件としては飽和地盤に対する諸弾性定数および密度等の数値(Halpern・Christiano, 1986)を用いた。また、無次元加振振動数および無次元透水係数 K_0 の2つのパラメータを用いて各種アンカーの変位応答特性を調べた。なお、想定される地盤の透水係数 k としては $10^{-1} \sim 10^{-5}$ m/sなる範囲を考えているために、無次元透水係数 K_0 は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ なる範囲を仮定した。

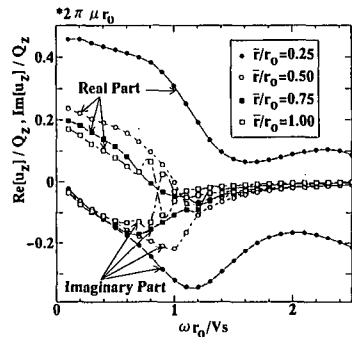
図-7は図-6に示した各種係留アンカーに対する変位の周波数応答を無次元透水係数 $K_0=0.001$ の場合について示したものである。なお、図中の $\text{Re}[\]$ および $\text{Im}[\]$ はアンカー変位の実部および虚部を取ることを意味す



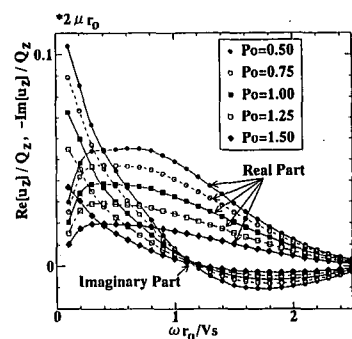
(a) 重力式アンカー



(b) H型鋼アンカー



(c) 摩擦型アンカー



(d) サクシジョンアンカー

図-7 係留用アンカーの変位応答 ($K_0=0.001$)

る。また、重力式アンカーについてはブロックの幅 $W(=2a)$ に対する沈み込み量 D をパラメータにして、摩擦型アンカーについてはアンカー支圧板の半径 r_0 に対するロッド半径 r の比 r/r_0 をパラメータにしてアンカー変位を図示している。一方、H型鋼アンカーおよびサクシオンアンカーについては、側面に作用する全摩擦抵抗力に対するサクシオンの比 P_0 をパラメータにしアンカー変位を図示している。なお、横軸の無次元加振振動数は各種アンカーの幅および半径を考慮したものとなっている。この図より、各種アンカーの地盤内部への沈み込みや埋設深さが大きくなるにつれて、アンカー側面と地盤との摩擦抵抗が大きくなるため、アンカー変位としては小さくなっている。また、サクシオンが作用するアンカーについては、側面の摩擦抵抗力に対するサクシオンの比 P_0 が大き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。なお、紙面の都合上、無次元透水係数 $K_0=0.001$ についてのみ示したが、 K_0 が小さくなるにつれていずれのアンカーについても変位応答は小さくなっている。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。

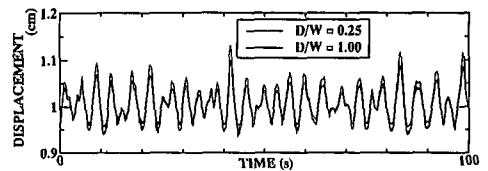
(2) アンカー変位の時刻歴応答

(1) で明らかになった各種アンカーモデルの周波数応答に基づき、今回現地観測された暴風波浪時の係留索張力を加振外力として、各種アンカーの変位応答を比較検討した。なお、地盤の伝播速度は $V_s=150$ m/s とする。

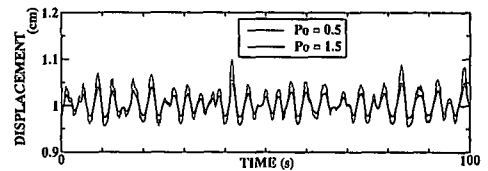
図-8 は、従来より汚濁防止膜の係留に対して用いられているコンクリート製ブロックの重力式アンカーに対する変位応答をブロックの幅に対する沈み込み量およびブロック底面に作用すると考えられるサクシオンの違いについて示したものである。なお、沈み込み量 D/W としては 0.25 および 1.00 の 2 つの場合とし、また、ブロックに作用する全摩擦抵抗力に対するサクシオンの比 $P_0=0.5$ および 1.5 について求めた。質量比 $c(=m_B/(\rho W^2 H))=500$ 、 $W=2.0$ m、 $H=1.8$ m、無次元透水係数 $K_0=0.001$ としている。また、 m_B はブロックの質量であり、 ρ は地盤の密度である。この図より明らかなように、ブロックの沈み込み量 D/W が大きくなるにつれてブロック周辺地盤との摩擦抵抗が増大するために重力式アンカーの変位応答は小さくなっている。また、全摩擦抵抗力に対するブロック底面に作用するサクシオンの比 P_0 が大き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。ここには示していないが、地盤の透水係数 k が小さく、地盤の横波の伝播速度 V_s 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。ところで、汚濁防止膜係留による係留外力がブロックの斜め

上方より作用することを考えればアンカーブロックの不等な沈み込み現象が生じやすいので、ブロック底面に作用するサクシオンを期待しにくいものと考えられる。

図-9 は、H型鋼アンカーのフランジの部分が全部沈み込んだ $H/D=1.0$ の場合におけるH型鋼に対する変位応答をH型鋼側面に作用する全摩擦抵抗力に対するサクシオン比 $P_0=0.5$ および 1.5 の 2 つの場合について求めたものである。なお、質量比 $c(=m_H/(\rho D^2 H))=500$ 、 $D=0.25$ m、 $H=0.25$ m、 $L=10$ m、 $K_0=0.001$ としている。また、 m_H はH型鋼アンカーの質量である。この図より、全摩擦抵抗力に対するサクシオン比 P_0 が大きくなるにつれて、H型鋼アンカー変位は小さくなる傾向を示している。また、H型鋼アンカーの沈み込み量 H/D が小さい場合にはアンカー変位は大きなものとなるが、係留時間が長期になれば沈み込み量が大きくなるため、アンカー変位応答としては小さくなるものと考えられる。なお、重力式アンカーの変位応答の場合と同様に、地盤の透水



(a) 沈み込み量 D/W による影響 ($P_0=1.0$)



(b) サクシオン比 P_0 による影響 ($D/W=1.0$)

図-8 重力式アンカーの変位応答 ($c=500$)

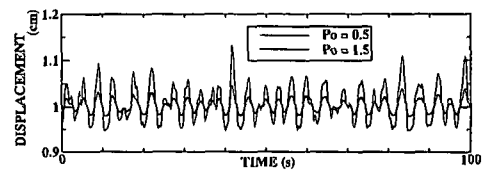


図-9 H型鋼アンカーの変位応答 ($c=500$)

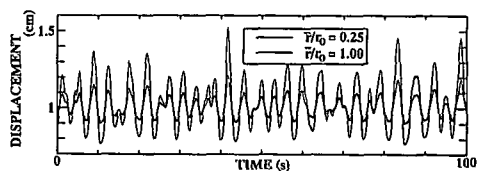
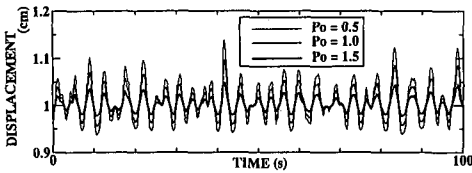
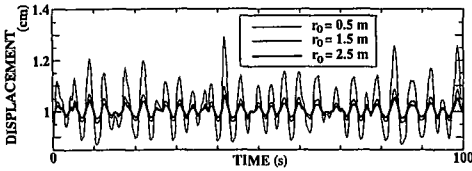


図-10 摩擦型アンカーの変位応答 ($L/r_0=10$)

(a) サクション比 P_0 による影響 ($r_0=1.5$ m)(b) アンカーの半径 r_0 による影響 ($P_0=1.0$)図-11 サクションアンカーの変位応答 ($L/r_0=10$)

係数 k が小さく、地盤の横波の伝播速度 V_s が大きくなれば、H型鋼アンカーの変位応答は小さくなる。

一方、図-10はアンカーロッド下端部にたわみ性の支圧板を有する摩擦型アンカーに対する変位応答を支圧板の半径 r_0 に対するアンカーロッド半径 r の比 $r/r_0=0.25$ および 1.0 の2つの場合について示したものである。なお、 $r_0=1.5$ m、アンカーロッド長 $L=15$ m、 $K_0=0.001$ としている。この図より、支圧板に対するアンカーロッド径の比 r/r_0 が大きくなるにつれて、アンカーロッド部分に作用する摩擦抵抗力が増大するため、摩擦型アンカーの変位応答は小さくなっている。また、アンカーロッド下端部に取り付けられる支圧板の半径 r_0 を大きくすれば、他の形式のアンカーより変位応答はかなり小さくなるものと考えられるが、施工面で問題が残る。

図-11はアンカー半径に対するスカート長 $L/r_0=10.0$ におけるサクションアンカーに対する変位応答にサクション比 P_0 およびサクションアンカーの半径 r_0 の違いが及ぼす影響について調べたものである。サクション比 $P_0=0.5, 1.0, 1.5$ の3つの場合および $r_0=0.5, 1.5, 2.5$ mの3つの場合について示した。なお、スカート長 $L=15$ m、 $K_0=0.001$ としている。この図より、スカート部分に作用する全摩擦抵抗力に対するサクション比 P_0 が大きくなるにつれて、サクションアンカーの変位応答は小さくなっていることがわかる。また、サクションアンカー半径 r_0 が大きくなるにつれてアンカーの変位応答は小さくなっている。当然のことながら、スカート長 L/r_0 が長くなれば、摩擦抵抗力が増大するためアンカー変位応答は小さくなる。なお、サクションアンカーは重力式アンカーやH型鋼アンカーの係留形態とは異なり、アンカー自重よりも周面摩擦力およびサクション効果に

より係留外力を受け持つため、サクションアンカーの沈設状態、係留中のサクション効果および周辺地盤との相互作用による地盤内部の応力・間隙水圧等の変化等が把駐力に影響を及ぼすものと考えられる。

4. 結 論

汚濁防止膜の係留用アンカーとして想定される重力式アンカー、H型鋼アンカー、支圧板を有する摩擦型アンカーおよびサクションアンカーについて、暴風波浪時における波・流れによる影響を受けた係留索張力に対する各種アンカーの変位応答を求めた。これにより、各種の係留アンカーの変位応答特性を考慮した把駐力に関する検討を行った。その結果、いずれの係留アンカーについても、係留索に発生する変動張力の振動数特性、地盤の透水係数、剛性等に適応した応答特性を有するアンカーを用いれば、波・流れによる変動張力がアンカーの応答に及ぼす影響が緩和されることがわかった。これらの結果から、従来用いられてきたコンクリート製ブロックの重力式アンカー（垂下型に対応）やH型鋼アンカー（自立型に対応）はそれぞれサクションの効果も取り込んでおり、妥当なアンカー形式といえることが明らかとなった。さらに、波・流れの条件の厳しい海域では係留外力の作用方向が大きく傾斜することが考えられるが、そのような場合には、支圧板をロッド下端部に有する摩擦型アンカーが施工性に問題が残るものの安定した把駐力が期待できる点で有力であることが指摘できる。

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 (1994): 浮体係留のための摩擦型アンカーの応答特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 966-970.
- 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.
- 前野賀彦・高谷富也・村川 博・川本博文 (1995): 汚濁防止膜の重力式アンカーの応答特性, 海洋開発論文集, Vol. 11 (印刷中).
- 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 tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606-632.