

2 点係留された船舶の係留アンカー周辺地盤の応答

Dynamic Response of Seabed around Anchors of a Double Point Mooring System

前野賀彦*・高谷富也**・平石哲也***・高山知司***
 Yoshi-hiko.Maeno, Tomiya.Takatani,
 Tetsuya.Hiraishi and Tomotsuka.Takayama

A double point mooring system has a merit to reduce the ship motion and a demerit to lose the control to change the direction of ship for minimizing a long period mooring force. Distributions of stresses and pore water pressure in seabed around anchors are investigated by analyzing a frequency response of end bearing anchor due to ship motion. Considering the interaction between anchor and seabed, the feasibility of a double point mooring system are examined, and the effects of both the stiffness and the mass ratio of anchor plate on the response of anchor plate are numerically investigated.

Keywords: Frequency response, Long period mooring force, Double point mooring system, End bearing anchor

1. はじめに

船舶の係留に際して、風と流れによる長周期外力と波漂流力を船側に受ける場合には、船首に受ける場合の4～5倍になると言われている。そのため、一般に漂流力が最小となるように船舶の方向を変えることが可能である一点係留方式が選択されることが多い。しかしながら、風や潮流等の条件によっては、船舶が振れ回るに際して、大きな長周期衝撃力が係留索・係留鎖・係留アンカーからなる係留システムに作用することが高山ら(1985)により確認されている。そこで、著者らは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検討すると共に、その振れ回りによる長周期衝撃力の緩和法として緊張係留方式を考え、その効果を検討した。その結果によれば、緊張係留により間隙水圧も非緊張係留時に比べてかなり軽減することができることが明らかとなった(高谷ら, 1992)。

上述の一点係留方式も、気象・海象条件の厳しい場所では、その適用性については十分検討する必要がある。特に、石油関連施設のようにオイルスピル等に対する安全性の面から、船舶の大きな振れ回りを許容しない場合には、多点係留方式についても、その適用性を検討すべきである。平石・高山(1992)は、多点係留ブイバースについて、暴風時のブイ単体の係留張力の特性と係留時における船体運動と係船張力の特性について、模型実験を行うことにより検討した。その結果、高波浪がブイ単体に作用したとき大きな衝撃力が発生すること、また、係船時のホーサー張力は、風と波の漂流力によりほとんど決定され、船腹方向から風が作用する場合に最も大きな張力が発生することが明らかになった。

そこで、本研究では、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に基づき、係留ア

ンカーの設置によるアンカー変位、アンカー周辺地盤の応力・間隙水圧の応答特性について検討した。特に、双錨泊時の係留張力における短周期および長周期変動成分に注目して、単錨泊における応答との比較を通じて、地盤の透水係数およびアンカー支圧板の質量比の違い等による係留アンカーおよびそれら周辺地盤の応答特性を調べた。

2. 双錨泊された船舶の係留張力について

本研究では、平石(1991)らが行った双錨泊された船舶(フェリー)の係留実験で得られた両舷張力を用いて、係留アンカーおよびその周辺地盤の応答を解析する。このため、本節では得られた張力波形について概説する。

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「おりんせすおきなわ」(垂線間距離120m、船幅20m、吃水5.34m、排水量6264ton)であり、図-1に示すように、この船舶は客船に似たスマートな船型をしており、右舷側に車両昇降用デッキを有しており、左右対称な船型になっていない。なお、係留実験では、この船舶を対

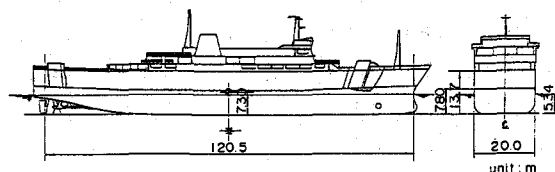


図-1 模型船の外観(おりんせすおきなわ)

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、単錨泊および双錨泊ともに275mとし、避泊地の水深は15m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。なお、定常風速は30、40および50m/sの3種類としている。

* 正会員 日本大学短期大学部 建設学科土木コース (274 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

** 正会員 舞鶴工業高等専門学校 土木工学科

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

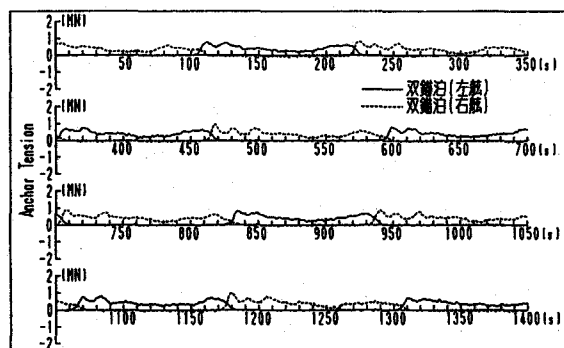


図-2 双錨泊時のチェーン張力の時間変動波形 (風速50m/s、開き角 $\theta=30^\circ$)

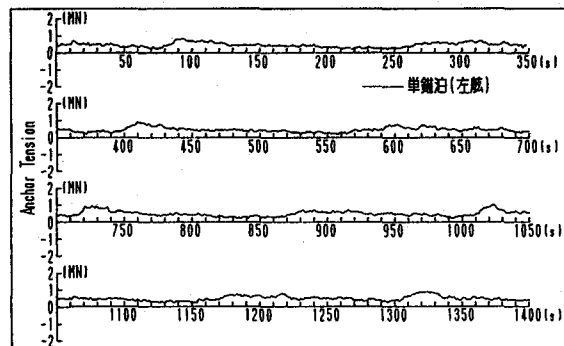


図-3 単錨泊時のチェーン張力の時間変動波形 (風速50m/s)

図-2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50m/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、左舷側が889 kN(91tf)、右舷側が1059 kN(108tf)のように、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。これは、昇降デッキのような構造物が船体表面に設置されている右舷側では風圧力が大きくなるためと考えられる。ところで、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。なお、ここには図示していないが、双錨泊時の開き角を一定とし、風速が30m/s、40m/sと大きくなるにつれて2本のチェーンに生じる張力の最大値は大きくなっている。

図-3は、風速50m/sにおける単錨泊(左舷側のチェーン1本による係留)において得られたチェーン張力の時系列波形を示したものである。この図より明らかなように、単錨泊の場合には係留点が船首ではなく左舷側にあり、また船型が左右対称になっていないため、複雑な変化を示しており、チェーンには常に張力が作用し、弛緩することがないことがわかる。また、図-4に示す風速50m/sの双錨泊における最大張力と比べて、単錨泊の最大張力は約1.2倍程度大きな値となっている。

ところで、双錨泊における2本の係留チェーンの開き

角と風向の違いが右舷側のチェーン張力に及ぼす影響については、平石ら(1992)により図-4に示す結果が得られている。上述したように、風向 $\alpha=0^\circ$ における開き角 θ の違いによる最大張力への影響は、 $\theta=45^\circ$ の場合に大きくなっている。また、開き角 θ を一定にして、風向 α の違いがチェーン張力に及ぼす影響を見れば、風向 $\alpha=$

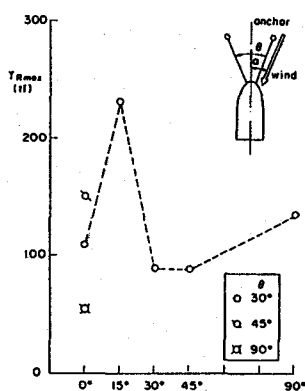


図-4 双錨泊における開き角と風向の影響 (平石ら, 1992)

15°を除いて、最大張力にあまり急激な変化はないことがわかる。風向 $\alpha=15^\circ$ の場合には、風向が右舷側の係留チェーンの方向と一致するため、大きな値となっており、最大張力は2274kN(232tf)となっている。

3. 係留アンカー変位の周波数応答について

本研究では、アンカー支圧板が設置されている海底地盤を多孔質飽和弾性地盤と仮定し、地盤の透水係数およびアンカー支圧板の質量比の違いによる係留アンカーおよびそれら周辺地盤の応答特性を前節の係留実験結果を用いて検討する。このため、多孔質飽和弾性地盤に埋設されたアンカーの周波数領域における変位、応力および間隙水圧に関する応答特性が必要となる。これらの周波数応答特性は、既に著者ら(1991, 1992, 1993)により得られている。なお、この多孔質飽和地盤は、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る複合体であり、地盤骨格と液体の相互作用を考慮したBiot(1956)の理論に基づくものである。

本節では、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て、アンカー支圧板の質量比の違いがアンカー支圧板の変位の応答特性に及ぼす影響について述べる(高谷ら, 1993)。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 $K_0 (= k V_s / g r_0)$ の2つの無次元パラメータを設定して、アンカー支圧板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 はアンカー支圧板の半径、 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、無次元透水係数 K_0 については、範囲 10^{-10} ~ 10^{-3} の値を仮定する。

図-5は、アンカー支圧板をたわみ性円盤と仮定し、アンカーの埋設深さ $H/B=5$ (H : アンカー支圧板の埋設深さ、 B : アンカー支圧板の直径($=2r_0$)) について、無次元透水係数 $K_0=10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合についてアンカー支圧板の中央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

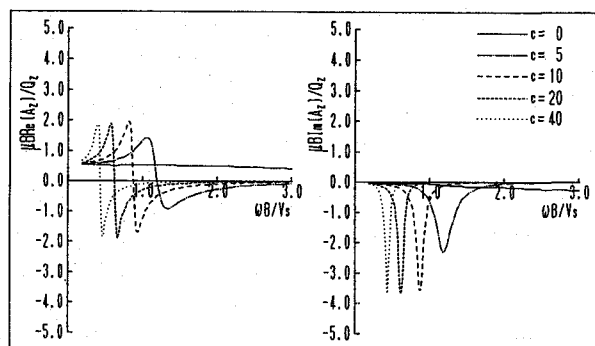
幅 A_z については、次式を用いる(高谷ら, 1993)。

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{m_p}{\rho r_0^3} \\ A_z &= \frac{Q_z}{\mu r_0} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - c a_0^2 f_1)^2 + (c a_0^2 f_2)^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

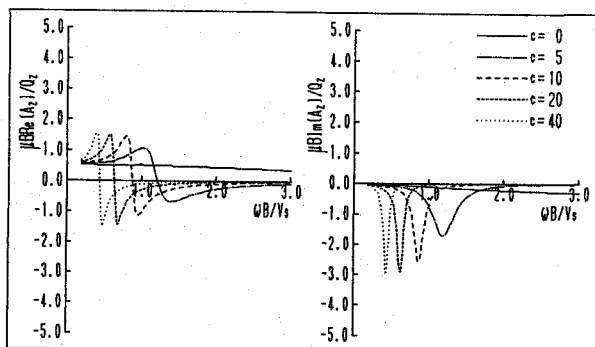
ここに、 Q_z は係留アンカーに作用する加振力の振幅、 μ 、 ρ および m_p はそれぞれ多孔質飽和弾性体のせん断弾性係数、密度およびアンカー支圧板の質量である。また、 f_1 、 f_2 は、それぞれ次式に示すアンカー支圧板の鉛直変位 u_z を表わす無次元係数項の実部および虚部である。

$$u_z = \frac{Q_z}{\mu r_0} (f_1 + i f_2) \dots\dots (2)$$

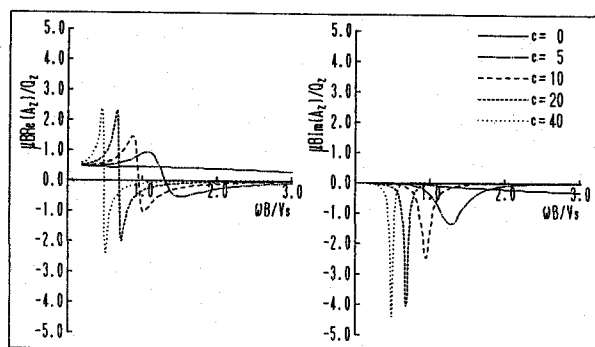
また、図中の $\text{Re} []$ および $\text{Im} []$ はそれぞれ実部および虚部を取ることを意味する。この図より明らかに、いずれの無次元透水係数 K_0 においても、アンカー支圧板の質量比 c が大きくなると共に、たわみ性円盤の応答のピーク振動数は無次元加振振動数の低い方へ移動し、応答のピーク値は大きくなり、振動系の減衰定数



(a) $K_0 = 10.0$



(b) $K_0 = 0.1$



(c) $K_0 = 0.001$

図-5 たわみ性円盤の変位と振動数の関係
($H/B = 5$, $p = 0.0$)

は小さくなっている。これは、質量比 c が大きくなる時、アンカー支圧板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(高谷ら, 1993)。

一方、図-6、7は、それぞれたわみ性円盤の平均変位および剛円盤変位より、加振力を一定としてアンカー支圧板の質量比 c を考慮した場合の支圧板変位の周波数応答を、アンカーの埋設深さ $H/B = 5$ 、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ の場合について示したものである。なお、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、アンカー支圧板の質量比 c の違いによるたわみ性円盤の平均変位および剛円盤変位に対する応答特性は、ほぼ実部および虚部ともに同じ程度の値となっていることがわかる。このことは、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より剛円盤の応答をある程度推定することができることを示している(高谷ら, 1993)。

ところで、無次元透水係数 $K_0 = 10.0$, 0.001 におけるたわみ性円盤の平均変位および剛円盤変位の応答特性はここでは図示していないが、図-6、7に見られるようにほぼ同じ振動数にピークを有している。このため、剛円盤の変位から得られる応答特性においては、アンカー支圧板の質量比 c が大きくなるにつれてピーク振動数は $\omega B/V_s = 1.0$ 付近となることがわかる。一方、図-5に示したたわみ性円盤の中央変位から得られる応答特性では、質量比 c が大きくなるにつれてピーク振動数は $\omega B/V_s < 1.0$ となっている。このことは、係留アンカーに作用する加振力(係留力)の振動数範囲が決まれば、対象としている海底地盤の横波の伝播速度がアンカー支

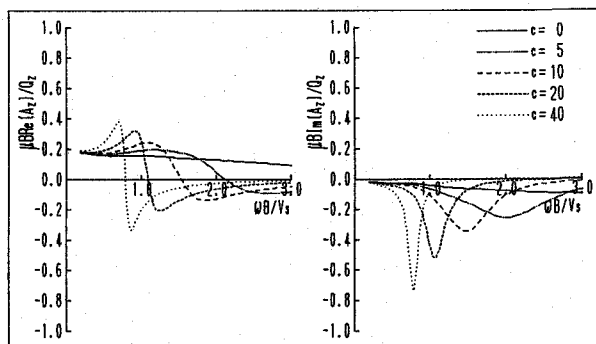


図-6 たわみ性円盤の平均変位と振動数の関係
($K_0 = 0.1$, $H/B = 5$, $p = 0.0$)

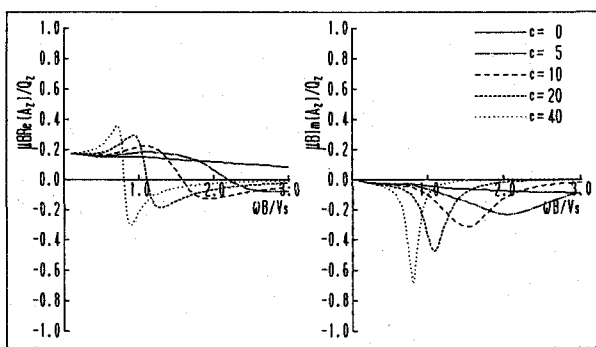


図-7 剛円盤の変位と振動数の関係
($K_0 = 0.1$, $H/B = 5$, $p = 0.0$)

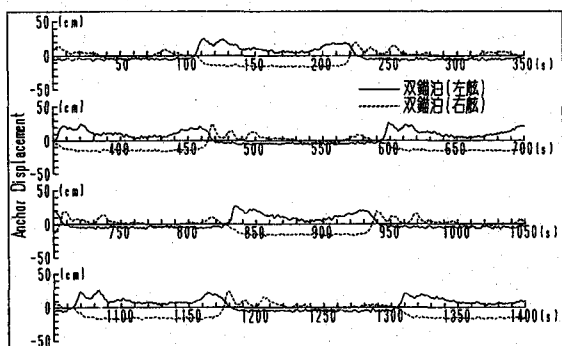
圧板の変位挙動を支配する一つの要因となることを意味している。すなわち、アンカーに作用する加振力のピーク振動数と質量比 c を考慮した周波数応答におけるピーク振動数が一致する場合には、大きなアンカー変位が生じることになる。

4. 数値計算結果とその考察

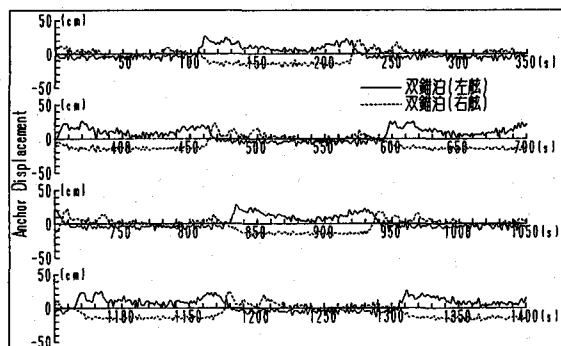
本節では、双錨泊および単錨泊における係留実験結果から得られるチェーン張力をアンカー支圧板に作用する加振力として用いて、変位、応力および間隙水圧に関する周波数応答より係留アンカーおよびアンカー周辺地盤の応答を求める。本研究では、海底地盤の剛性の違いを表わす指標として、地盤の横波の伝播速度 V_s をパラメータにして応答計算を行う。

図-8、9は、地盤の横波の伝播速度 V_s がそれぞれ 50m/s および 200m/s の各場合について、アンカー支圧板の質量比 $c=0, 10, 40$ の3つの条件についてアンカー変位の時刻歴応答を示したものである。なお、アンカー

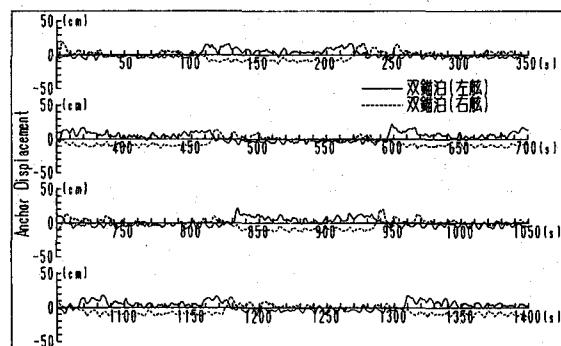
に作用する係留加振力として 風速 50m/s、開き角 $\theta=30^\circ$ 、風向 $\alpha=0^\circ$ の双錨泊時の両舷張力を用いた。なお、アンカー支圧板をたわみ性円盤とした場合の周波数応答を用いている。これらの図より、質量比 $c=0$ の場合は、いずれの伝播速度においてもほぼ同じ挙動を示している。しかしながら、図-5に示すたわみ性円盤の応答曲線からも明らかのように、質量比 c が大きくなるにつれて、伝播速度 V_s が 50m/s の場合には、アンカーに作用する係留力の振動数範囲と周波数応答との関係より、応答波形はいずれの質量比 c についても複雑なものとなっていることがわかる。伝播速度 V_s が 200m/s の場合には応答値の大小はあるものの、応答波形はいずれの質量比 c についてもほぼ同じものとなっている。また、アンカーに作用している最大張力は、右舷側の短周期変動成分の最大値が左舷側よりも大きいため、右舷側の最大張力が左舷側よりも大きくなっているが、アンカー変位応答の最大値については、右舷側が左舷側に比べて小さな値となっている。これは、アンカーに作用



(a) $c = 0$

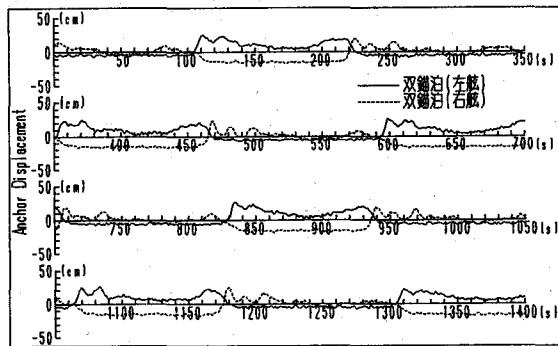


(b) $c = 10$

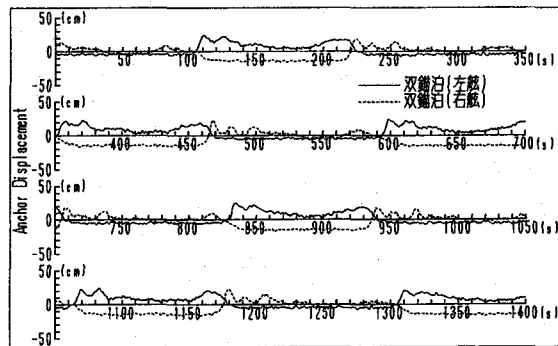


(c) $c = 40$

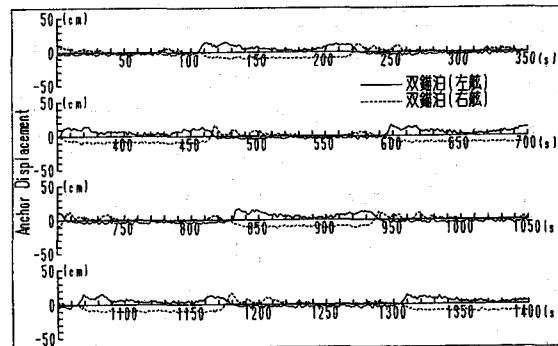
図-8 アンカー変位の時刻歴応答 ($V_s=50$ m/s, $K_0=0.1$, $H/B=5$, $p=0.0$)



(a) $c = 0$



(b) $c = 10$



(c) $c = 40$

図-9 アンカー変位の時刻歴応答 ($V_s=200$ m/s, $K_0=0.1$, $H/B=5$, $p=0.0$)

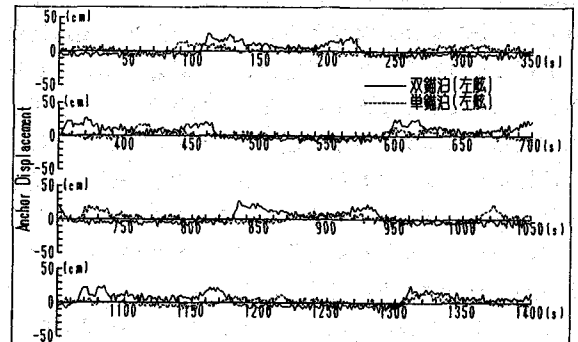
する係留張力における短周期変動成分に対して、アンカー変位の周波数領域における応答特性の特徴が顕著に反映された結果であるものと考えられる。

一方、アンカー支圧板を剛円盤とした場合の周波数応答特性を用いたアンカー変位の時刻歴応答を示したものが図-10である。剛円盤の周波数応答を示した図-7からも明らかなように、変位応答値はたわみ性円盤の場合に比べてかなり小さくなっていることがわかる。また、質量比 $c=40$ の場合には、周波数領域での応答特性が顕著に反映されるため、高振動数を含んだ応答波形となっている。

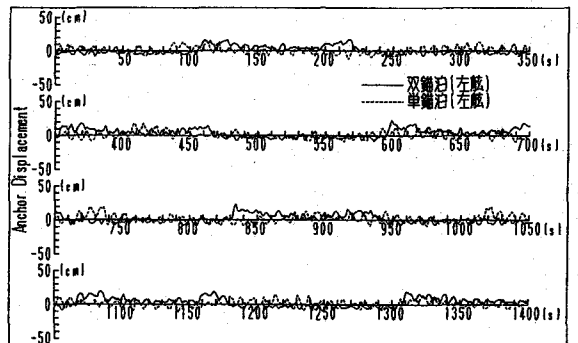
図-11は、アンカー支圧板をたわみ性円盤とする場合の周波数応答を用いて、横波の伝播速度 V_s が 50m/s の場合について、風速 50m/s の条件における双錨泊（開き角 $\theta=30^\circ$ 、風向 $\alpha=0^\circ$ ）と単錨泊との左舷側張力に対して、アンカー支圧板の質量比 $c=10, 40$ の2つの場合におけるアンカー変位の時刻歴応答を示したものである。図-2、3に見られるように、双錨泊における左舷側張力が単錨泊に比べて小さい値となっているが、アンカー変位の応答値としては、双錨泊の方が単錨泊より大きな値となっていることがわかる。これは、単錨泊の張力波形は、常に張力が作用し、弛緩することがないため、衝撃的な変動がある程度懸垂で吸収されることや短周期変動成分が双錨泊のそれと比べて小さくなっていることによるものと考えられる。したがって、係留張力波形における最大値からアンカー変位の応答値を推定する場合には、張力波形を短周期成分と長周期成分に分けて検討することが重要である。

一方、図-12は風速 50m/s の条件における双錨泊（開

き角 $\theta=30^\circ$ 、風向 $\alpha=90^\circ$ ）の両舷張力に対して、アンカー支圧板の質量比 $c=10, 40$ の2つの場合におけるアンカー変位の時刻歴応答を示したものである。この条件における双錨泊の場合は、船の右舷真横から風が吹くことになるため、左舷側の張力は非常に小さく、ほとんど右舷側だけで係留した状態になり、係留チェーン

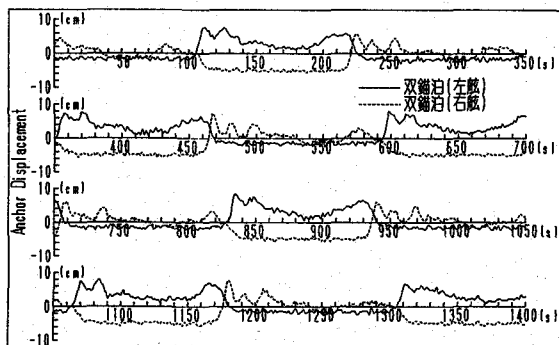


(a) $c=10$

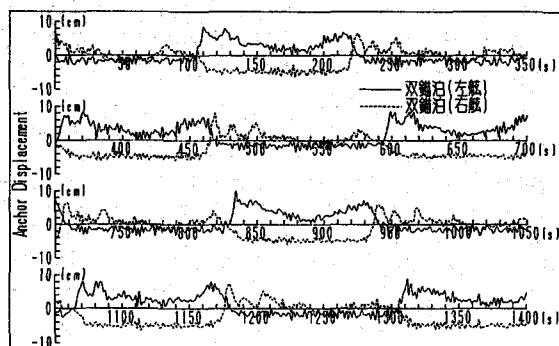


(b) $c=40$

図-11 アンカー変位の時刻歴応答 ($V_s=50$ m/s, $K_0=0.1$, $H/B=5$, $p=0.0$)

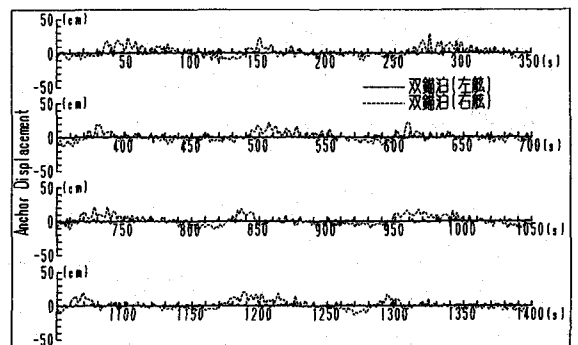


(a) $c=10$

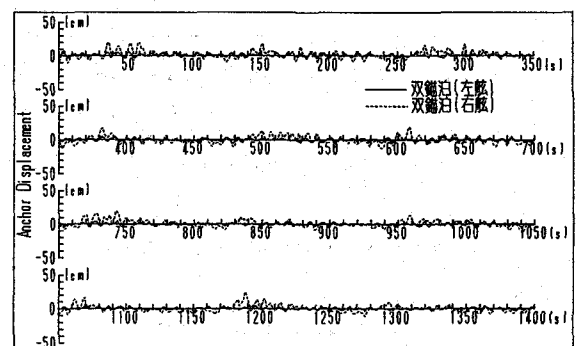


(b) $c=40$

図-10 アンカー変位の時刻歴応答 ($V_s=50$ m/s, $K_0=0.1$, $H/B=5$, $p=0.0$)



(a) $c=10$



(b) $c=40$

図-12 アンカー変位の時刻歴応答 ($V_s=50$ m/s, $K_0=0.1$, $H/B=5$, $p=0.0$)

には常に張力が作用し、弛緩することがないため、図-3に示されている単錨泊の左舷張力の時系列波形と同じような波形となっている。このため、同図からも明らかなように、右舷張力に対する応答が図-11に示す単錨泊のそれに似たものとなっていることがわかる。

図-13~15は、アンカーに作用する係留加振力として風速50m/s、開き角 $\theta = 30^\circ$ 、風向 $\alpha = 0^\circ$ の双錨泊時の両舷張力を用いた場合のアンカー支圧板の周辺地盤における鉛直応力、せん断応力および間隙水圧の時刻歴応答を示したものである。なお、応力および間隙水圧の周波数応答は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ におけるたわみ性円盤に対するものを用いている。また、横波の伝播速度 V_s は 50m/sとしている。これらの図より明らかなように、図-2に見られる時系列波形の最大張力に応じて、右舷側張力に対する応答値は、左舷側に比べて大きくなっていることがわかる。ところで、アンカー周辺地盤における応力および間隙水圧の周波数応答特性は、アンカ

一支圧板の質量比 c を考慮したアンカー変位の周波数応答特性と比較して、低振動数領域においては著しい変動が見られない(高谷ら, 1992)。このことがアンカー周辺地盤における応力および間隙水圧の時刻歴応答に反映しているものと考えられる。

したがって、図-4に示されている双錨泊における開き角 θ と風向 α との関係からも明らかなように、係留ラインと風向が一致する場合には、アンカー周辺地盤においてかなり大きな応力および間隙水圧が生じることが考えられる。また、応力および間隙水圧の周波数応答特性においては、地盤の透水係数が大きい場合には、液体の荷重分担率 p によるアンカー周辺地盤の応力および間隙水圧への影響が顕著なものとなるが、透水係数が小さくなるにつれてその影響は小さくなるため(高谷ら, 1992)、アンカー周辺地盤における応力および間隙水圧の応答値を推定する場合には、アンカー支圧板の質量比、地盤の剛性および透水係数に注意を払う必要がある。

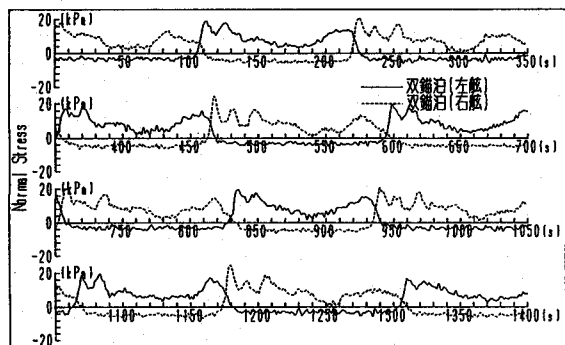


図-13 鉛直応力の時刻歴応答
($H/B=5$, $z/B=4.5$, $r/B=0$, $p=0.5$)

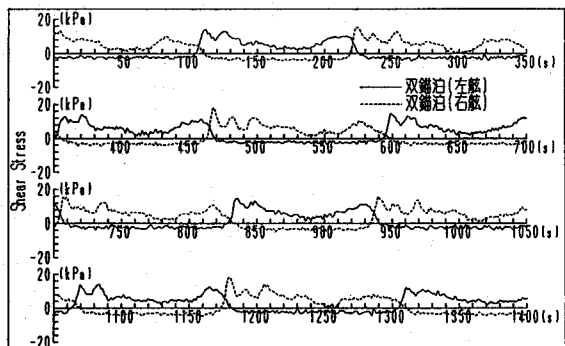


図-14 せん断応力の時刻歴応答
($H/B=5$, $z/B=4.5$, $r/B=0.5$, $p=0.5$)

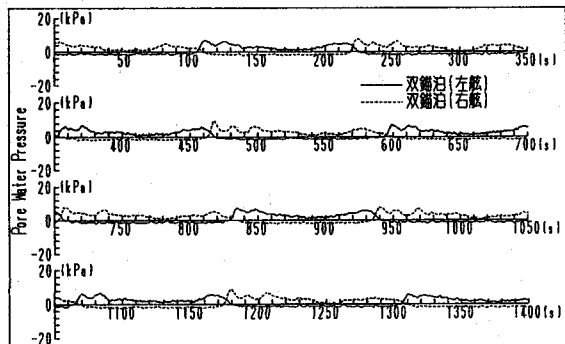


図-15 間隙水圧の時刻歴応答
($H/B=5$, $z/B=4.5$, $r/B=0$, $p=0.5$)

5. あとがき

本研究は、双錨泊された船舶の係留張力に関する実験結果に基づいて、アンカー支圧板の質量比、地盤の剛性および透水係数の違いが、2点係留された船舶の係留アンカーの変位およびアンカー周辺地盤の応力・間隙水圧の応答特性にどのような影響を及ぼすかについて調べた。その結果、アンカー支圧板の質量比、地盤剛性および透水係数のみならず、双錨泊の係留張力に含まれる短周期変動成分の影響が、アンカー変位の応答値に顕著に現れることがわかった。

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・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(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 (印刷中)。
- 高山知司・平石哲也・古川正美・佐尾邦久・立野信一郎(1985): 一点係留ブイの運動と係船索張力に関する現地観測、港湾技研資料、運輸省港湾技術研究所、No. 542, pp.1~38。
- 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。
- 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 Poroeleastic Half-Space to Steady-State Harmonic Surface Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol.10, pp.606~632。