

# 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

高谷 富也\*・前野 賀彦\*\*・平石 哲也\*\*\*・高山 知司\*\*\*\*

## 1. 序 論

係留船舶の振れ回りの範囲を狭く限定することが出来ることや振れ回り運動によって発生する係留鎖・係船索の衝撃張力を和らげる効果が期待できる利点を有する緊張係留アンカーの採用について従来より検討されてきたが、杭打ちや地盤のコンクリート置換等の海底作業を伴うことによる施工の困難さや経済性の面から現時点では大型ブイへのわずかな施工例を除いて広くは採用されていない。高山ら (1985) は、石油備蓄基地用の大型一点係留ブイの大波高に対する適用例として緊張係留に関する現地観測結果を報告している。しかしながら、これらの適用例はすべて岩盤基礎を対象としたもので、軟弱地盤を対象とした施工例は皆無である。浮体係留方式は大水深での適用が期待されることからすれば、大水深で想定される軟弱地盤への適用が検討されるべきである。高谷ら (1991) は、平石・本城 (1991) の船首一点係留方式で係留された船舶に定常風を作用させた場合のアンカーチェーン張力・ホーサー張力に関する実験結果を用いて、アンカー変位およびアンカー周辺地盤の変位間隙水圧応答を求めた。なお、彼らは、浮体構造物への作用力として卓越する水平方向の力に対して有効であると考えられる支圧型アンカーを対象として、砂質地盤について動的応答解析を行っている。

本研究では、船首一点ブイ係留方式で緊張係留された船舶の振れ回り運動による係留索・係留鎖張力に関する実験データを用いて、海底地盤モデルとして想定した土粒子骨格と間隙水の二層系から構成される多孔質飽和地盤に埋設された緊張係留アンカーおよびアンカー周辺地盤の応答を Biot (1956) の理論に基づく動的応答解析により求めた。また、その結果を非緊張係留アンカーの周辺地盤の応答特性と比較することにより、船舶の振れ回りによる係留索・係留鎖張力への緊張係留アンカーの緩和効果を検討した。

## 2. 緊張係留実験の概要

図-1 に示すように船首一点ブイ係留方式において、係留アンカーと避泊ブイ間のアンカーチェーンに予め緊張力を導入する緊張係留方式 (図-1 (b) 参照) は、同図 (a) に見られる従来の非緊張係留方式に比べて係留船舶の振れ回りの範囲を狭くすることができ、また船舶の振れ回り運動によって発生する係留鎖・係船索張力を和らげる効果を有している。

表-1 は平石・本城 (1991) が行った船舶係留の実験条件を示したものである。縮尺は1/50、係留船舶はプリンスオキナワ (120m 級)、係留方式は船首一点係留方

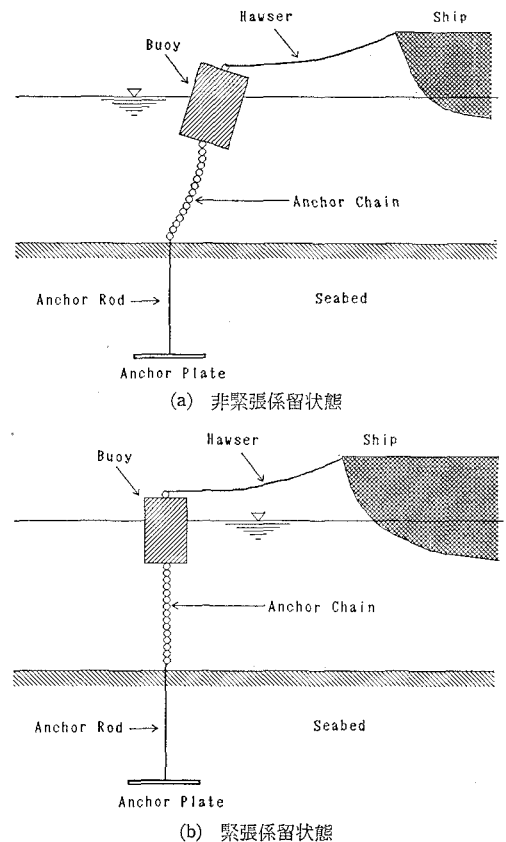


図-1 船舶係留状態

\* 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 農博 日本大学短期大学部助教授 建設科土木コース

\*\*\* 正会員 工修 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 水工部長

表-1 船舶係留の実験条件

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| 縮尺   | 1/50                          |
| 係留船舶 | プリンセスおきなわ(120m級)              |
| 係留方式 | 船首一点ブイ係留方式                    |
|      | 避泊ブイ：直径3.6m、高さ1.8m、吃水1.4mの円筒型 |
|      | 船首ブイ：径137mmナイロン製ホーサー(80m)     |
|      | ブイアンカー：径76mmチェーン(25m)         |
| 外力   | 定常風50m/s                      |
| 水深   | 15m                           |

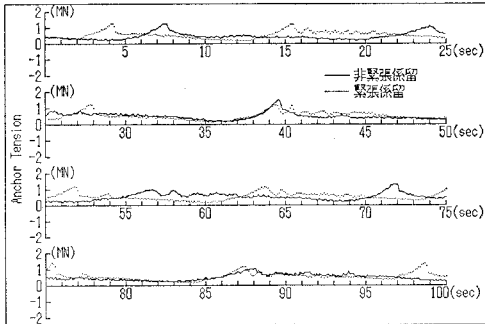


図-2 係留鎖張力の時刻歴変動 (100 秒間)

式で、外力は定常風 50 m/s を用いている。なお、緊張係留実験においては、避泊ブイと海底とを結ぶ係留鎖の長さを水深と同じとし、避泊ブイの浮力と釣り合わせただけで係留鎖には緊張力は導入されていない。本研究ではこれを緊張係留としている。

図-2 は、係留鎖張力の実験結果の一部を示したものである。この図より、風速 50 m/s のもとで緊張係留の場合における係留鎖張力は、非緊張係留に比べて小さな値となっており、係留鎖に緊張力が導入されていないにもかかわらず約 0.93 倍程度の張力に緩和されていることがわかる。これは、係留鎖に適当な緊張力が導入されれば、係留鎖張力をかなり緩和することができることを示唆しているものと考えられる。

### 3. 多孔質飽和弾性地盤に関する解析

本研究では、海底地盤モデルとして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から構成される多孔質飽和弾性地盤を想定し、アンカーに作用する外力をアンカー支圧板のみに作用するものと仮定する。また、前節において述べられた船舶係留実験より得られた係留鎖張力をアンカーに作用する外力として用いることにより、多孔質飽和地盤内部に埋設された緊張係留アンカーおよびアンカー周辺地盤の応答を Biot (1956) の理論に基づく動的応答解析により求める。この場合、多孔質飽和地盤内部の円形面上に等分布に作用する加振力（以下、鉛直等分布加振力と呼ぶ）による変位・応力解が必要となるが、これについては既に高谷ら (1991, 1992) が液体の荷重分担率  $p$  を考慮した変位・応力解を

求めており、アンカー支圧板の中央変位の周波数応答特性について検討されている。本節では、アンカー支圧板周辺地盤における地盤骨格および液体の応力に関する周波数応答特性について述べる。

#### (1) 多孔質飽和弾性地盤の計算条件

本研究は、シルトや粘土からなる軟弱地盤への係留アンカーの適用を目的としたものであるが、現状では岩盤基礎への適用例がわずかにあるのみなので、岩盤基礎における係留実験の経験を踏まえ、まず手始めに砂質地盤への係留アンカーの適用を考えたものである。多孔質飽和弾性地盤の計算条件として、表-2 に示すような飽和した粗い砂質土に関する諸弾性定数および密度等の数値を用いる (Halpern・Christiano, 1986)。

表-2 諸弾性定数、密度等の数値

|                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu=98\text{MPa}$ , $\lambda=432\text{MPa}$ , $Q=280\text{MPa}$ ,<br>$R=274\text{MPa}$ , $\nu=0.3$ (ポアソン比),<br>$f=0.48$ (多孔質飽和弾性地盤の間隙率),<br>$\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$ (弾性骨格の密度),<br>$\rho_l=1.0\text{g/cm}^3$ (液体の密度), |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

ここに、 $\mu$ ,  $\lambda$  は多孔質飽和弾性地盤の Lamé の定数、 $Q$  は弾性骨格と液体の連成弾性係数、 $R$  は液体の圧縮剛性に関する係数である (Biot, 1956)。また、上記の  $\rho_s$ ,  $\rho_l$  は素材としての密度であり、有効密度  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{22}$  および質量連成係数  $\rho_{12}$  の関係は次式で表わされる。

$$\rho_{11} + \rho_{12} = (1-f)\rho_s, \quad \rho_{12} + \rho_{22} = f\rho_l \quad \cdots (1)$$

ここに、 $\rho_{12}$  は仮定の密度で、負の値をとる。この  $\rho_{12}$  については、種々の検討を踏まえて本研究では  $\rho_{12}=0$  とする。

次に、Biot (1956) の与える運動方程式には、液体と骨格の相対速度による減衰項が含まれており、この減衰項の係数である減衰係数  $b$  は、Darcy 則を用いて次式に示す無次元量に書き換えて、パラメータとして値を設定する。

$$\frac{b}{\omega\rho_s} = f^2 \frac{\rho_l}{\rho_s} \frac{1}{aK_0} \quad \cdots (2)$$

ここに、 $a=\omega r_0/V_s$ ,  $K_0=kV_s/gr_0$  (無次元透水係数)、 $k$  は透水係数、 $g$  は重力の加速度、 $r_0$  はアンカー支圧板の半径、 $\omega$  は円振動数、 $V_s$  は横波の伝播速度である。また、無次元透水係数  $K_0$  については、透水係数  $k=10^{-1}\sim 10^{-5}$  m/s なる範囲の値を考え、本研究では、無次元透水係数  $K_0$  として 10.0, 0.1, 0.001 の 3 つの値を仮定する。

#### (2) アンカー周辺地盤における応力の周波数応答

アンカー周辺地盤における骨格および液体の応力の周波数応答は、無次元加振振動数  $\omega r_0/V_s$  に対して次式のような無次元係数項の実部 ( $S_1\sim P_1$ ) および虚部 ( $S_2\sim P_2$ ) を用いて図示する。

$$\sigma_z = q_z(S_1 + iS_2) \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{xz} = q_z(T_2 + iT_2) \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_p = q_z(P_1 + iP_2) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $q_z$  はアンカー支圧板に作用する分布加振力の幅 ( $Q_z = \pi r^2 q_z$ ,  $Q_z$ : 加振力の合力),  $i = \sqrt{-1}$  である。

図-3, 4 は、アンカーの埋設深さ  $H/B=5$  ( $H, B$ : アンカーの埋設深さおよびアンカー支圧板の直径 $=2r_0$ ) の場合について、液体の荷重分担率  $p$  をパラメータとして、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における鉛直応力  $\sigma_z$  の周波数応答を示したものである。なお、図中の  $Re[\ ]$  および  $Im[\ ]$  は実部および虚部を取ることを意味する。これらの図より明らかなように、アンカー支圧板の埋設深さ  $H/B=5$  は一種の『限界深さ』に相当しているため(高谷・北村, 1990), アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における鉛直応力  $\sigma_z$  はいずれの  $K_0$  についても逆符号でほぼ同じ程度の値となっ

ていることがわかる。また、無次元透水係数が  $K_0$  大きい場合には液体の荷重分担率  $p$  が大きくなるにつれて、鉛直応力  $\sigma_z$  は小さくなっている。これは、分担率を考慮することによって骨格部分に作用する加振力が小さくなるためである。一方、 $K_0$  が小さくなれば液体の荷重分担率  $p$  による鉛直応力  $\sigma_z$  への影響は小さくなっている。これは、 $K_0$  が小さくなるにつれて、骨格と液体との相對運動が小さくなることによるものと考えられる。

一方、図-5, 6 は一種の『限界深さ』である埋設深さ  $H/B=5$  の場合について、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における液体の応力  $\sigma_p$  の周波数応答を示したものである。これらの図より、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における液体の応力  $\sigma_p$  は逆符号でほぼ同じ程度の値となっている。また、鉛直応力  $\sigma_z$  の場合と同様に無次元透水係数  $K_0$  における荷重分担率  $p$  の影響は同じ傾向を示していることがわかる。

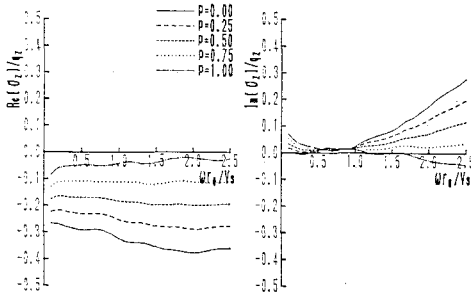
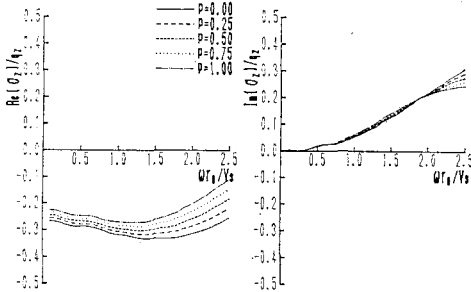
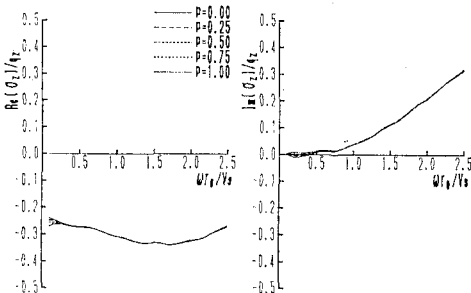
(a)  $K_0=10.0$ (b)  $K=0.1$ (c)  $K_0=0.001$ 

図-3 鉛直応力  $\sigma_z$  の周波数応答  
( $H/B=5$ ,  $z/B=4.5$ ,  $r/B=0$ )

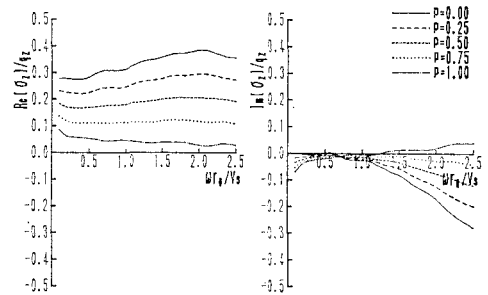
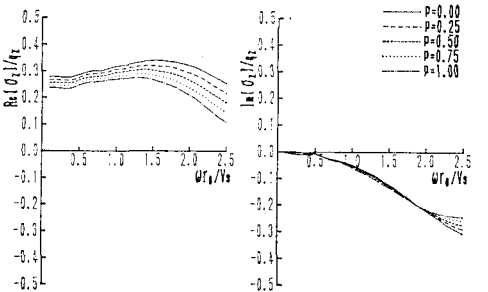
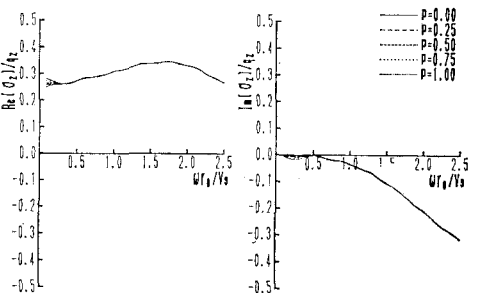
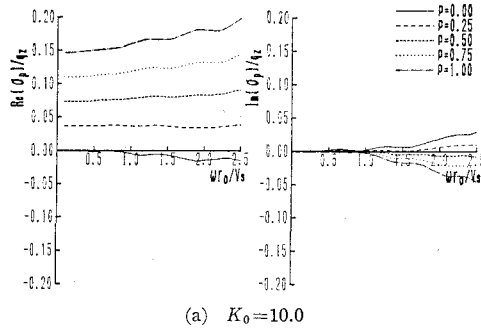
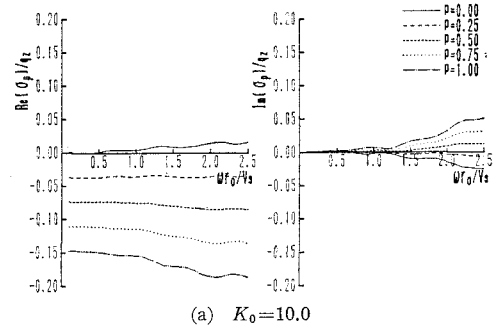
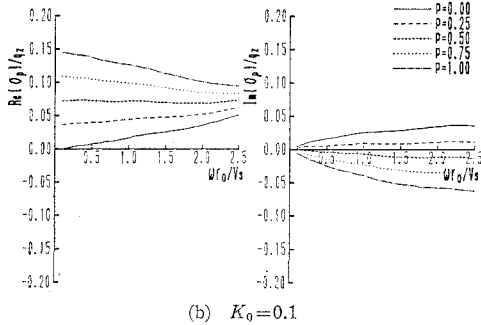
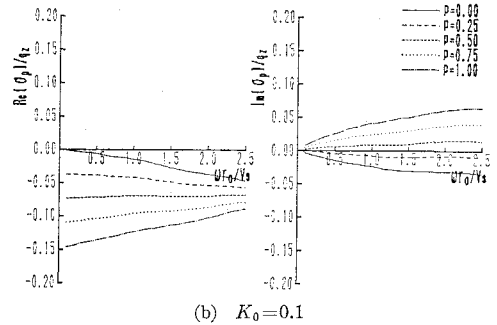
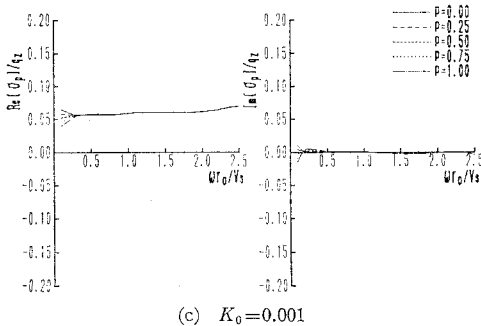
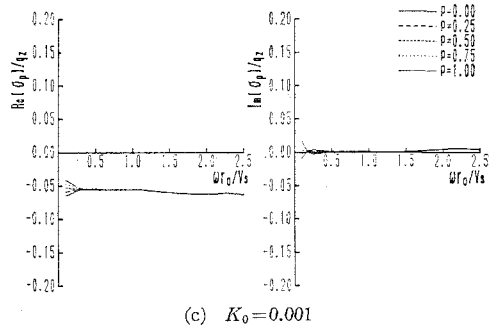
(a)  $K_0=10.0$ (b)  $K_0=0.1$ (c)  $K_0=0.001$ 

図-4 鉛直応力  $\sigma_z$  の周波数応答  
( $H/B=5$ ,  $z/B=5.5$ ,  $r/B=0$ )

(a)  $K_0=10.0$ (a)  $K_0=10.0$ (b)  $K_0=0.1$ (b)  $K_0=0.1$ (c)  $K_0=0.001$ (c)  $K_0=0.001$ 

図—5 液体の応力  $\sigma_p$  の周波数応答  
( $H/B=5$ ,  $z/B=4.5$ ,  $r/B=0$ )

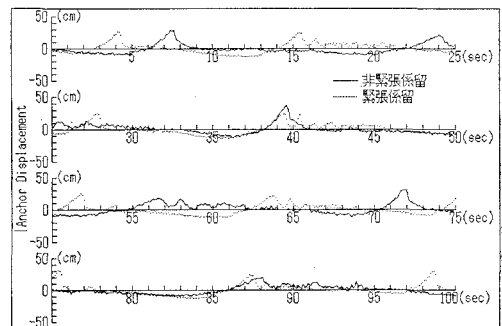
図—6 液体の応力  $\sigma_p$  の周波数応答  
( $H/B=5$ ,  $z/B=5.5$ ,  $r/B=0$ )

ところで、アンカー支圧板の周辺地盤におけるせん断応力  $\tau_{sr}$  についても、無次元透水係数  $K_0$  および液体の荷重分担率  $p$  の違いがせん断応力  $\tau_{sr}$  に及ぼす影響については鉛直応力や液体の応力に見られたように同様の傾向を示すことがわかっている (高谷ら, 1992)。

#### 4. 数値解析結果とその考察

本節では、非緊張係留および緊張係留による船舶係留実験より得られるアンカーチェーン張力を外力として、前節における周波数応答結果よりアンカー支圧板の変位およびその周辺地盤における間隙水圧の時刻歴応答を求めた。なお、アンカー支圧板の直径を  $B=3.0\text{ m}$  とする。

図—7 は、無次元透水係数  $K_0=0.1$  の場合について非緊張係留アンカーおよび緊張係留アンカー支圧板の中央変位の時刻歴応答の比較を示したもので、アンカー支



図—7 アンカー変位の時刻歴応答 ( $H/B=5$ ,  $p=0.0$ )

圧板変位の周波数応答は既に高谷ら (1991) により与えられている。この図より明らかなように、緊張係留アンカー変位の方が非緊張係留に比べて小さな値を示している。

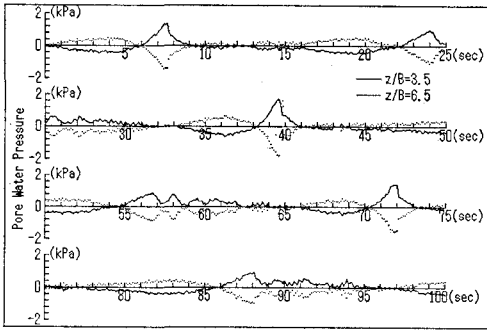
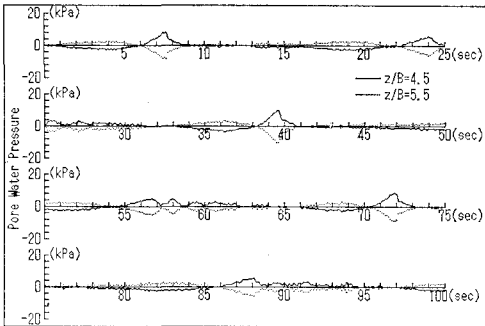
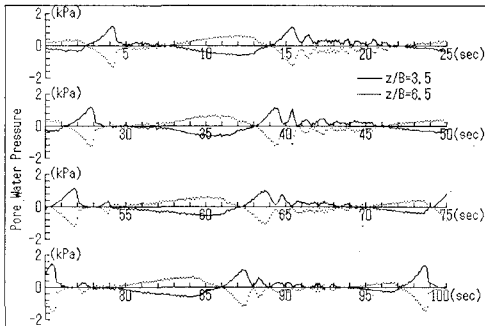
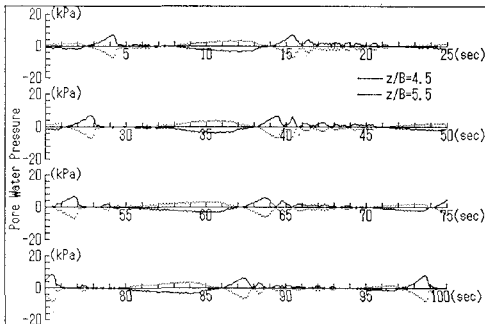
(a)  $z/B=3.5, 6.5$ (b)  $z/B=4.5, 5.5$ 図-8 非緊張係留アンカー周辺地盤における間隙水圧の時刻歴応答 ( $K_0=10.0$ ,  $H/B=5$ ,  $p=0.5$ )(a)  $z/B=3.5, 6.5$ (b)  $z/B=4.5, 5.5$ 図-9 緊張係留アンカー周辺地盤における間隙水圧の時刻歴応答 ( $K_0=10.0$ ,  $H/B=5$ ,  $p=0.5$ )

図-8, 9 は、それぞれ非緊張係留および緊張係留アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における間隙水圧の時刻歴応答を示したものである。これらの図より、アンカー支圧板の埋設深さが『限界深さ』に相当しているため、アンカー支圧板を挟んで上下対称な位置における間隙水圧の時刻歴応答は、前節の周波数応答結果からも明らかのように、逆符号でほぼ同じ程度の値となっている。また、アンカー変位の応答に見られたように、緊張係留アンカー周辺における地盤の間隙水圧の方が非緊張係留に比べて小さな値を示しており、約 0.85 倍程度に緩和されていることがわかる。緊張係留アンカーを使用すれば、アンカー支圧板の周辺地盤に発生する間隙水圧を非緊張係留アンカーに比べてかなり緩和することができることを示唆しているものと考えられる。

## 5. 結 論

本研究において得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 緊張係留によるアンカーチェーン張力は非緊張係留に比べて小さな衝撃力となる。このため、アンカーチェーン張力をアンカーに作用する外力として入力した場合には、非緊張係留に比べて小さなアンカー変位となる。
- 2) 地盤の透水係数が大きい場合 ( $k=10^{-1}$  m/s), アンカーチェーン張力に対する液体の荷重分担率のアンカー変位およびアンカー周辺地盤の応力や間隙水圧への影響は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ほとんど現れない。
- 3) 緊張係留アンカーを使用すれば、アンカー支圧板の周辺地盤に発生する間隙水圧を非緊張係留アンカーに比べてかなり緩和することができる。

## 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・高山知司・平石哲也 (1991): 定常風を受ける係留船舶の揺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・高山知司・平石哲也 (1992): 定常係留力を受けるアンカー周辺地盤の周波数応答特性について, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 451-456.
- 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留索張力に関する現地観測, 港研資料, No. 542, pp. 1-38.
- 平石哲也・本城 智 (1991): 避泊フェリーの係留張力と揺れ回り運動に関する検討, 港研報告, 第 30 巻, 第 2 号, pp. 3-50.
- Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 168-178.
- Halpern, M. R. and P. Christiano (1986): Response of poroelastic half-space to steady-state harmonic surface tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 609-632.