

浮体係留のための摩擦型アンカーの応答特性

高谷 富也*・前野 賀彦**・平石 哲也***・高山 知司****

1. 序 論

密な砂地盤や硬粘土地盤における浮遊式海洋構造物の永久係留法の一つとして、パイルアンカーがある。現時点では相当広範囲な土質に適応されており、杭打ちによる方法、穿孔とグラウト、注入工法およびこれらの組み合わせによる工法が採られている。地盤種別によって水中杭打ち機の能力の制約から杭の十分な根入れが得られない場合や軟弱地盤であるため十分な周面摩擦抵抗値が得られないことが予想される場合には、穿孔とグラウトによる方法が選択され、杭の先端部にスカートやウィング等を設けたり、アンダーリーマーを用いて先端部をベル状に施工する等支圧効果を期待する構造が採られている。高谷ら(1991, 1992)は、定常風を受ける係留船舶の振り回りによるアンカー周辺地盤の応答を検討することにより、支圧型アンカーが軟弱地盤における浮体係留方法として優れていることを示した。彼らの解析に際しては、支圧板の効果の検討に着目していることから、支圧板の直径に対して支圧型アンカーのロッドの直径が無視できる程小さいものとして、ロッド部分における周面摩擦の効果については考慮していない。しかしながら、穿孔とグラウトによる施工に基づく実際の支圧型アンカーの構造においては、アンカーロッド径は無視することはできずロッド部分の周面摩擦が発揮されることから、厳密にはアンカーロッド部分の周面摩擦の効果を考慮した上で応答解析を行う必要がある。

このような状況を考慮して、本研究では単純杭を摩擦型アンカーの支圧板とロッド径の比が1である特殊な場合であるとして、同一の杭モデルとして取り扱い、アンカーロッド部分の周面摩擦の効果と支圧板の効果の両者を考慮した変位解析を行ったものである。なお、海底地盤として地盤骨格と液体の二相系から構成される多孔質飽和弾性地盤をとした。まず、アンカーロッド部分に作用する周面摩擦を考慮するために、ロッド部分を単杭とし、単杭先端部分に支圧板を有する摩擦型アンカーモデル

を想定し、摩擦型アンカー変位の周波数応答を求めた。また、海底地盤の透水係数、アンカー支圧板の半径に対するロッド径の比などが摩擦型アンカーの変位応答特性に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。さらに、アンカー支圧板をたわみ性円盤および剛円盤とした2つの場合について、支圧板の剛性を考慮した摩擦型アンカーの変位も合わせて解析した。次いで、係留実験で得られるアンカーチェーン張力を係留加振力として用いて、摩擦型アンカー変位の時刻歴応答を求めたものである。

2. 解析手法

本研究は、図-1に示すようにアンカーロッド部分の下端部に半径 r_0 の支圧板を有する摩擦型アンカーを想定し、アンカーロッド径の影響、すなわちロッド部分に作用する周面摩擦力の摩擦型アンカー変位応答への影響を調べる。まず、摩擦型アンカーの先頭部に調和型係留加振力が作用した場合を考え、海底地盤の透水性を考慮した地盤特性を摩擦型アンカーの変位応答解析に導入し、支圧板の剛性やロッド径の違いがアンカー変位の周波数応答に及ぼす影響について調べる。

アンカーロッド部分を弾性棒と仮定すれば、図-1に示す摩擦型アンカーは、(弾性棒)+(支圧板)なるアンカーモデルとなり、摩擦型アンカーのロッド部分の頭部、すなわち弾性棒の先頭部に係留加振力が作用するものと見なせる。

ところで、棒の縦振動の運動方程式は次式で表わされる。

$$-\rho_p A_p \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + E_p A_p \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - f = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_p 、 A_p 、 E_p はそれぞれ棒の密度、断面積および弾性係数である。また、 w は鉛直変位であり、 f は単位長さ当たりの力、すなわち地盤反力である。

次に、調和型振動が弾性棒の先頭部に作用した場合を考える。このとき、地盤反力についても調和型反力とすれば、式(1)は次式のように書き表わされる。

$$\omega^2 \rho_p A_p w + E_p A_p \frac{d^2 w}{dz^2} - f = 0 \dots\dots\dots (2)$$

* 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 農博 日本大学短期大学部助教授 建設学科
 *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所主任研究員 水工部
 **** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所部長 水工部

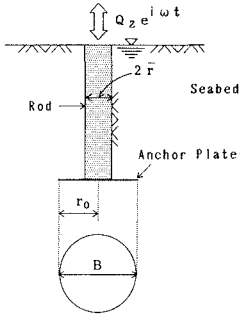


図-1 摩擦型アンカー

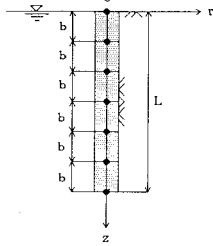


図-2 棒の分割モデル

ところで、リング状分布加振力による変位解を与える式(6)の Q_z が式(3)における地盤反力 $c_i b f (i=1, 2, \dots, N+1)$ なる値を取れば、各分割点の変位と地盤反力は次式のように関係づけられる。

$$\{w\} = [\Delta] \{C\} b f \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\{w\}$ 、 $\{C\}$ はそれぞれ各分割点における変位および係数ベクトルである。また、 $[\Delta]$ は式(6)を利用して得られる影響係数マトリックスである。

一方、棒下端の支持力については、支圧板による地盤反力を考える。例えば、支圧板をたわみ性円盤と仮定する場合には、次式に示す円形面上に作用する等分布加振力による変位解 u_z (高谷・北村, 1990) より得られる値の逆数 s_R を用いて、 R は次式のように書き表わされる。

$$R = s_R w_{N+1} \dots\dots\dots (8)$$

以上より、式(3)に式(4)の境界条件、式(7)の棒周辺の地盤反力、式(8)で与えられる棒下端における支圧板に作用する地盤反力を考慮すれば、棒の運動方程式は次式のように書き表わすことができる。

$$(\omega[M] + [T] - [S])\{w\} = \{Q\} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 $\{Q\}^T = \{-2Q_z, 0, \dots, 0\}$,

$$[M] = \rho_p A_p b \begin{bmatrix} -1/2 & & & & 0 \\ & 1 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & 1 & \\ 0 & & & & 1/2 \end{bmatrix},$$

$$[T] = \frac{E_p A_p}{b} \begin{bmatrix} -2 & 2 & & & 0 \\ 1 & -2 & 1 & & \\ & & \dots & & \\ & & & 1 & -2 & 1 \\ 0 & & & & 2 & -2 \end{bmatrix},$$

$$[S] = [\Delta]^{-1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2s_R \end{bmatrix}$$

最終的に、式(9)を解くことにより、アンカーロッド下端部に支圧板を有する摩擦型アンカーの先頭部分に係留力が作用した場合のアンカー変位の周波数応答が得られる。

3. 摩擦型アンカーの変位応答

本研究では、海底地盤として、Biot (1956) により提案された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を想定する。この多孔質飽和弾性地盤に埋設された摩擦型アンカーに浮体係留力が作用した場合のアンカー変位の応答特性を調べる。まず、地盤の透水性およびアンカー支圧板の剛性の違いが摩擦型アンカーの周波数応答特性に及ぼす影響について明らかにし、次いで浮体係留力を受ける摩擦型アンカー変位の時刻歴応答について検討する。

いま、図-2 に示すようにロッド部分に相当する弾性棒を等間隔に分割し、各分割点での中央差分をとれば、式(2)は次式のように書き表わされる。

$$c_i \omega^2 \rho_p A_p b w_i + \frac{E_p A_p}{b} (w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}) - c_i b f = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N+1) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $b = L/N$ 、 $c_i = 1 (i=2, 3, \dots, N)$ 、 $c_1 = c_{N+1} = 1/2$ である。なお、 L は棒の長さである。

一方、弾性棒の境界条件は、縦振動に対しては次式のように与えられる。

$$\text{棒先頭: } E_p A_p \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} = -Q_z \dots\dots\dots (4 \cdot a)$$

$$\text{棒下端: } E_p A_p \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=L} = -R \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

ここに、 Q_z は棒先頭部に作用する鉛直加振力の荷重振幅であり、 R は棒底面に働く地盤反力、すなわち棒下端の支持力である。なお、本研究では棒下端には支圧板が存在するため、 R は支圧板に働く地盤反力となる。棒先頭および棒下端の分割点で中央差分をとれば、式(4)の境界条件は差分式で次式のように表わされる。

$$w_0 = w_2 + \frac{2b}{E_p A_p} Q_z, \quad w_{N+2} = w_N - \frac{2b}{E_p A_p} R \dots\dots (5)$$

差分化した境界条件式(5)を考慮すれば、式(3)において w_0 、 w_{N+2} を消去することができる。

次に、地盤反力については、棒断面を円形と仮定して以下のように取り扱う。半径 r の円周上に鉛直方向に作用するリング状分布加振力による変位解 u_z は次式のように表わされる (前野ら, 1993)。

$$u_z = -\frac{Q_z}{4\pi\mu} \int_0^\infty \frac{\kappa U(\kappa)}{\beta \theta F(\kappa)} J_0(\kappa \bar{r}) J_0(\kappa r) d\kappa \dots\dots (6)$$

ここに、 Q_z は半径 r の円周上に作用する加振力の合力 ($=\pi r^2 q_z$)、 $r (= \sqrt{x^2 + y^2})$ 、 μ は地盤のせん断弾性係数、 $J_0(\cdot)$ は第0次ベッセル関数である。なお、上式の被積分関数に見られる β 、 θ 、 $F(\kappa)$ 、 $U(\kappa)$ は波数 κ の関数である (高谷・北村, 1990)。

(1) アンカー変位の周波数応答

本節では、海底地盤条件として、Halpern・Christiano (1986)が用いた粗い飽和砂質土に対する諸弾性係数および密度等の数値を用いて、地盤の透水係数およびアンカー支圧板の剛性の違いが摩擦型アンカーの変位応答にどのような影響を及ぼすかについて検討する。ここでは、アンカー支圧板の半径 r_0 に対するアンカーロッドの半径 \bar{r} の比 \bar{r}/r_0 、無次元加振振動数 $\omega_0(=\omega r_0/V_s)$ および無次元透水係数 $K_0(=kV_s/gr_0)$ の3つの無次元パラメータを設定して、次に示される摩擦型アンカー変位 u_z の絶対値 $\sqrt{f_1^2+f_2^2}$ を用いて周波数応答を図示する。

$$u_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} (f_1 + if_2) \dots\dots\dots (10)$$

なお、上記の無次元パラメータ中に見られる 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、地盤の透水係数として $k=10^{-1}\sim 10^{-5}$ m/s の範囲を考えているため、無次元透水係数 K_0 は $10\sim 10^{-3}$ なる範囲の値を仮定する。さらに、摩擦型アンカーのロッド長 L については、 $L/B=5.0$ (B : アンカー支圧板の直径 $=2r_0$) とし、アンカーロッド部分の分割数は $N=20$ としている。

図-3は、無次元透水係数 $K_0=10.0, 0.1, 0.001$ において \bar{r}/r_0 をパラメータにして摩擦型アンカー変位 (アンカーロッド先端部の変位) の周波数応答を示したものである。なお、無次元加振振動数 ω_0 の範囲は $0.1\sim 2.5$ とし、アンカーロッド下端部の支圧板はたわみ性円盤としている。この図より、支圧板に対するアンカーロッド半径の比 \bar{r}/r_0 が大きくなるにつれて、ロッド部分に働く周面摩擦が増大するために摩擦型アンカー変位は小さくなっている。また、 $\bar{r}/r_0=0.25$ の場合のアンカー変位は他の \bar{r}/r_0 に比べてかなり大きな変位応答となっていることがわかる。これは、アンカーロッド部分に働く周面摩擦およびアンカーロッド径の違いによる細い棒と単杭に近い棒との変位挙動の影響がアンカーの変位応答に顕著

に現れたものと考えられる。

図-4は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ における支圧型アンカーと摩擦型アンカー変位の比較を行ったものである。なお、支圧型アンカーのロッドは摩擦力の働かない剛体と仮定し、支圧型アンカーの埋設深さは $H/B=5.0$ (H : 支圧板の埋設深さ) として、摩擦型アンカー下端部の支圧板と同じ深さとしている。また、同図には参考として支圧板に対するアンカーロッド半径の比 $\bar{r}/r_0=0.10$ の場合も併せて図示しておいた。この図より、支圧型アンカーの変位応答は、無次元加振振動数全域にわたって、摩擦型アンカーの変位よりも大きなものとなっている。しかし、 $\bar{r}/r_0=0.10$ の摩擦型アンカーの変位応答はアンカー支圧板のそれよりもかなり大きなものとなっていることがわかる。これは、摩擦型アンカーのロッド径が小さいためにロッド部分に働く周面摩擦力が期待できず、地盤反力が働かない弾性棒としての変位挙動が卓越したことによるものである。

一方、図-5は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ において支圧板に対するロッド半径の比 $\bar{r}/r_0=0.5, 1.0$ の2つの場合について、摩擦型アンカーのロッド先端部の変位と支圧板が有るロッド下端部の変位の比較を行ったものである。図中の○印がロッド先端部の変位を、また●印がロッド下端部における変位を示している。この図より、支圧板に対するアンカーロッド半径の比 $\bar{r}/r_0=0.5$ の場合については、無次元加振振動数が高くなるにつれてロッド部分の変形モードの移行による影響が顕著に現れていることがわかる。しかしながら、 $\bar{r}/r_0=1.0$ の場合においては、ロッドの先端部と下端部の変位はほぼ同じ変位量となっており、多少ロッド部分の変形モードの移行による影響が現れているもののほぼ剛体的な変位挙動をしていることがわかる。

また、図-6は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ において支圧板に対するロッド半径の比 $\bar{r}/r_0=0.25, 1.0$ の2つの場合について、摩擦型アンカー下端部に有る支圧板の剛性

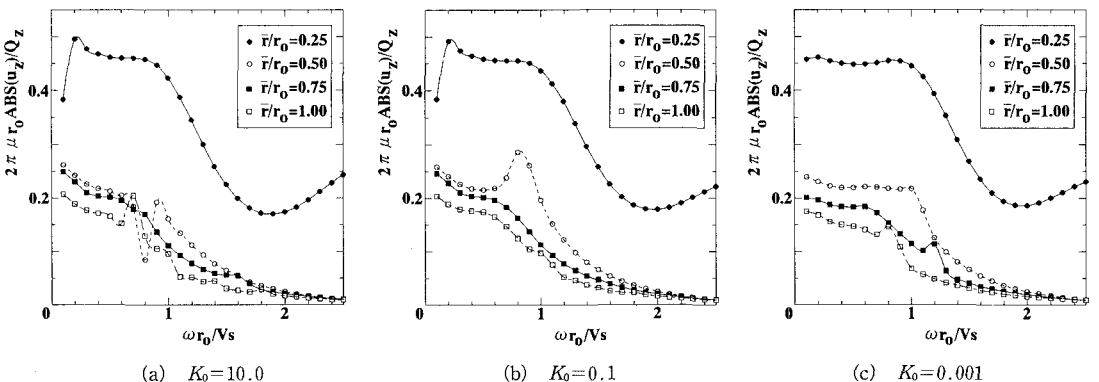


図-3 摩擦型アンカーの周波数応答 ($L/B=5.0$)

の違いがアンカー変位に及ぼす影響について示したものである。図中の●印が支圧板をたわみ性円盤とした場合の変位を、また○印が支圧板を剛円盤とした場合の変位を示している。この図より明らかなように、支圧板に対するアンカーロッド半径の比 $\bar{r}/r_0=0.25$ の場合については、無次元加振振動数全域において支圧板の剛性による影響がアンカー変位に現れているが、 $\bar{r}/r_0=1.0$ の場合においては低振動数領域においてのみ支圧板の剛性による影響が現れていることがわかる。これは、支圧板に対するアンカーロッド半径の比 \bar{r}/r_0 が大きく

なるにつれて、ロッド部分に働く周面摩擦がロッド下端部の支圧板に働く地盤反力に比べて相対的に大きくなるためである。したがって、 \bar{r}/r_0 が大きくなれば、ロッド下端部の支圧板による影響は小さくなり、摩擦型アンカーの変位応答はロッド部分に働く周面摩擦に強く依存するものと考えられる。

(2) 摩擦型アンカーの時刻歴応答

本研究では、平石ら(1991)が行った船首一点係留ブイ方式で係留された船舶の係留実験で得られたアンカーチェーン張力を用いて摩擦型アンカーの変位応答を求め

る。図-7は、風速 50 m/s において得られた避泊ブイ下のアンカーチェーン張力の時系列波形を示したものである。なお、係留実験に用いた船舶は、現在沖繩定期航路に就航している‘ぶりんせすおきなわ’ (垂線間距離 120 m, 船幅 20 m, 吃水 5.34 m, 排水量 6264 トン) である。

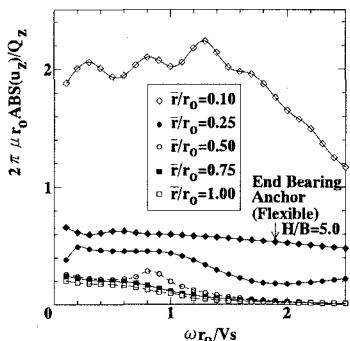


図-4 支圧型と摩擦型アンカーの比較 ($K_0=0.1$)

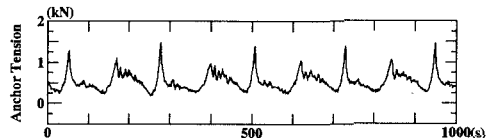


図-7 係留鎖張力の時刻歴変動

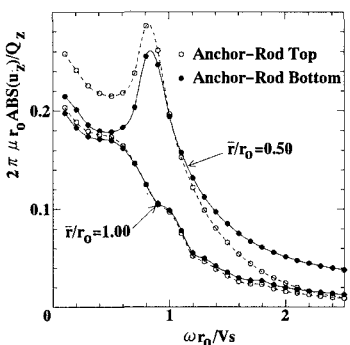
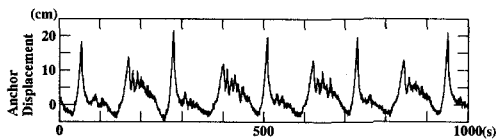
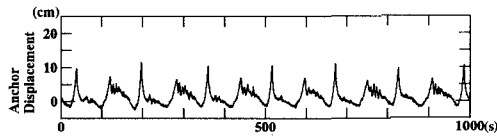


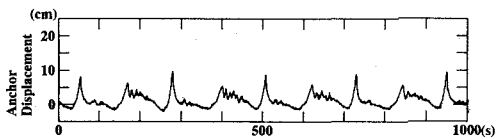
図-5 ロッド先頭部と下端部の変位の比較 ($L/B=5.0$)



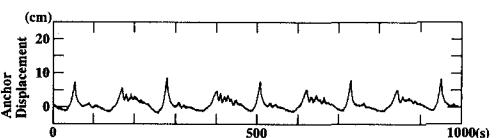
(a) $\bar{r}/r_0=0.25$



(b) $\bar{r}/r_0=0.50$



(c) $\bar{r}/r_0=0.75$



(d) $\bar{r}/r_0=1.00$

図-8 摩擦型アンカー変位の時刻歴応答 ($K_0=0.001, L/B=5.0$)

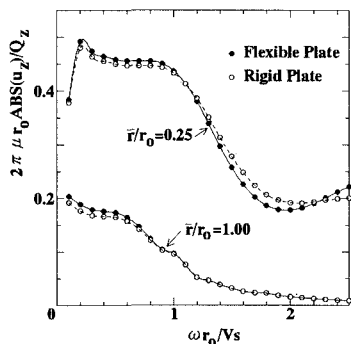
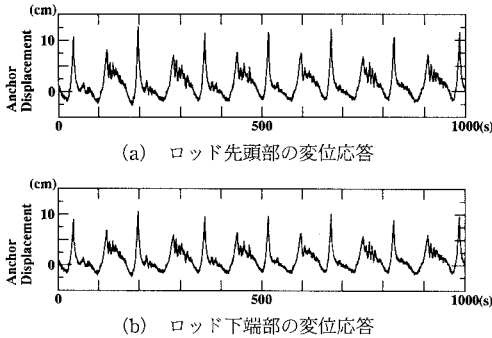


図-6 支圧板の剛性とアンカー変位の関係 ($L/B=5.0$)

表一 摩擦型アンカー変位応答の最大値の倍率

\bar{r}/r_0	無次元透水係数 K_0		
	10.0	0.1	0.001
0.25	1.868	1.883	2.515
0.50	1.479	1.454	1.336
0.75	1.435	1.398	1.119
1.00	1.201	1.177	1.000



図一9 摩擦型アンカー変位の時刻歴応答 ($K_0=0.1, \bar{r}=0.50, L/B=5.0$)

係留実験では、この船舶を対象として1/50の縮尺で模型を製作している。チェーン長は275 m、避泊地の水深は15 mで一定としている。また、避泊ブイは係留鎖で海底に係留されている。このため、本研究では海底地盤に設置された摩擦型アンカーの先頭部に係留鎖端部が接続されているものとして、摩擦型アンカー変位の応答解析を行う。

図一8は、無次元透水係数 $K_0=0.001$ において、支圧板に対するロッド半径の比 \bar{r}/r_0 をパラメータにして摩擦型アンカー変位の時刻歴応答を示したものである。この図より、 \bar{r}/r_0 が大きくなるにつれてアンカー変位応答は小さくなるとともに、波浪によりアンカーチェーン張力に生じる短周期変動成分に対する変位も小さくなっていることがわかる。これは、図一3(c)に示されている $K_0=0.001$ における摩擦型アンカー変位の周波数応答について、高振動数領域になれば変位の応答値が小さくなっていることによるものと考えられる。また、表一は無次元透水係数 $K_0=10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合について、 $K_0=0.001$ における $\bar{r}/r_0=1.00$ の変位応答値を基準にして各 \bar{r}/r_0 に対する摩擦型アンカーの変位応答の倍率を示したものである。この表より明らかなように、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれて摩擦型アンカー変位は小さくなっていることがわかる。また、無次元透水係数 $K_0=0.001$ の $\bar{r}/r_0=0.25$ における変位応答が最大となっているが、これは図一3(c)の周波数応答において低振動数領域での応答特性が $K_0=10.0, 0.1$ の2つの

の比べて大きな変位応答となっているためと考えられる。

図一9は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ の $\bar{r}=0.5$ において、摩擦型アンカーのロッド先頭部およびロッド下端部の変位応答の比較を行ったものである。この図より、図一5に示す周波数応答より明らかなように、摩擦型アンカーのロッド下端部の変位は先頭部のそれよりも小さなものとなっていることがわかる。また、図一5の周波数応答より、 \bar{r}/r_0 が大きくなるにつれてロッド先頭部の変位と下端部のそれとはほぼ同じ程度の値なることがわかる。

4. 結 論

本研究は、アンカーロッド下端部に支圧板を有する摩擦型アンカー変位の周波数応答を求め、海底地盤の透水係数、支圧板に対するアンカーロッド径の比などが摩擦型アンカーの変位応答特性にどのような影響を及ぼすかについて調べた。また、船舶の係留実験で得られるアンカーチェーン張力を加振力として、摩擦型アンカーの時刻歴変位応答を求めた。その結果、アンカー支圧板の半径に対するアンカーロッド半径の比 \bar{r}/r_0 が大きくなるにつれて、アンカーロッド部分の周面摩擦の効果により、摩擦型アンカーの変位応答は小さくなる。しかしながら、 $\bar{r}/r_0 < 0.5$ において見られたアンカー変位の減少に比べて、 $\bar{r}/r_0=0.75, 1.0$ では、あまり顕著な変位量の減少は見られない。このため、係留加振力を受ける摩擦型アンカーの変位の時刻歴応答では、地盤の透水係数が小さくなれば $\bar{r}/r_0=0.5, 0.75, 1.0$ の3つの場合に対する応答結果はほぼ同じ程度の値となった。

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振り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): 船舶の振り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.
 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り回り運動, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 731-735.
 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オ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 tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606-632.