

潮位変動を受ける杭基礎の支持力特性について

Bearing Capacity of Pile Foundation against Tide Level Change

高谷富也*・前野賀彦**

Tomiya Takatani and Yoshi-hiko Maeno

The response of bearing pile with expanding end plate to tide level change was evaluated by FEM analysis in order to investigate a feasibility of pre-cast concrete bearing pile with expanding part to floating structure foundation. The end bearing pile was assumed to be an elastic solid, and the soil was assumed to be a fluid saturated poroelastic medium for some seabed grounds such as sand, silt and clay. The size effect of an end bearing plate at the tip of pile was numerically estimated for various seabed grounds. Simulation results imply that such end bearing pile has the effect on the dissipation of excess pore water pressure around pile.

Key words: bearing pile, floating structure, tide level change, FEM analysis

1. はじめに

従来の浮体栈橋工法 (QIP) は、多くの場合鋼管杭を所定の支持層に到達するように打設し、その上に構造物を設置するものであるが、軟弱層が相当厚い場合には所定の支持層まで杭を打設することの経済性が問題となることが想定される。特に仮設構造物である場合には、その撤去の容易性も考慮に入れられるべきである。問題を単純化するため、まず潮位変動は大きいさがほど波浪条件が厳しくない海底に軟弱層が相当厚く堆積している内湾について考えることにした。このような条件下では浮体構造物が有利性を増すと考えられるが、ここでは単純に浮体を係留するのではなく、基礎杭にアンカー機能を持たせ浮体を固定する構造を考える。つまり、杭基礎の上部構造として箱型浮体 (ポンツーン) を考え、それが一部海水中に潜水した構造を考える。この場合、基礎杭は上載荷重に対しては十分な支持力を有し、潮位変動による浮力の増加に対しては把駐力を発揮する構造が求められる。さらに、波浪条件が厳しくなるにしたがって、この構造が波浪による浮体の動揺に対しても十分な把駐特性を有することが求められる。このような構造を実用化するためには、杭の把駐機能を増大させる必要がある。前野ら (1995) によれば、①杭の周面摩擦力を高める、②支圧板を設けて支圧効果を高める、③サクシンの積極的利用等が把駐力を増大させるために有効であることが確認されている。高谷ら (1994) は、海底地盤を Biol (1956) により提案されている空隙を有する土粒子骨格とその空隙を完全に満たす圧縮性の間隙水の二相系から構成される多孔質飽和弾性地盤と想定し、この地盤に設置された支圧板を有するアンカー杭に浮体係留外力を作用させた場合におけるアンカー杭周辺の地盤応答を周波数領域において求めている。そこで、前野・児玉 (1995) が提案している拡底率を高めた先端拡底杭の適用を考え、高谷ら (1994) が提案している支圧板を有するアンカー杭

のモデルを用いて、周期的な潮位変動に対するアンカー杭および周辺地盤の応答特性を求め、潮位変動に対して求められるアンカー杭の把駐力および支持力の検討を行ったものである。本研究では、これまでの著者らの一連の研究成果を踏まえて、実務面への適用を考慮して、種々の海底地盤に対する諸条件を容易に入力し、アンカー杭およびその周辺地盤の応答解析ができる FEM 解析プログラムを用いる。

2. 解析手法

本研究では、軟弱地盤における圧密沈下や弾塑性変形を考慮することができる有限要素法を用いて、海底地盤に設置された先端に支圧板を有するアンカー杭に周期的な潮位変動外力が作用した場合の応答解析を行う。なお、海底地盤として、砂質土、シルトおよび粘性土を考え、それぞれの地盤における透水係数およびアンカー先端の支圧板の直径の違いがアンカー杭およびアンカー周辺地盤の変位、間隙水圧の応答特性に及ぼす影響について調べる。

次いで、潮位変動外力として実際の港湾で測定された潮位変動を用いて、時間領域におけるアンカー周辺地盤における応答特性の検討を行う。

図-1 は箱型浮体の基礎構造物として支圧板を有するアンカー杭を用いたモデルを示したものである。実際には、複数のアンカー杭により箱型浮体を係留する構造を考えているが、ここでは単純化のため1つのアンカーとした。

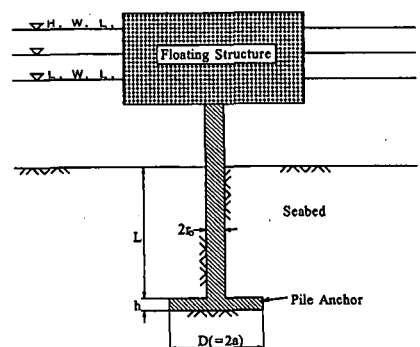


図-1 箱型浮体と支圧板を有するアンカー杭モデル

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科
(〒625 京都府舞鶴市白屋234)

** 正会員 日本大学短期大学部 建設学科

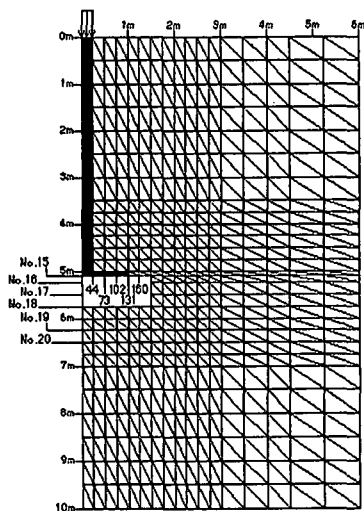


図-2 支圧板を有するアンカー杭の解析モデル

このモデルにおいては、干潮時に箱型浮体の重量の一部が杭に作用するため杭には十分な支持力が求められる。満潮時には浮体に浮力が作用するため杭には十分な把駐力が求められる。図-1からも明らかなように、箱型浮体の一部が海水中に潜水した状態でアンカー杭に接続されているため、潮位変動による浮力の増加に対して把駐力を発揮する支圧板を有するアンカー杭形式となっている。本研究では、潮位変動による箱型浮体の浮力の増減をアンカー杭に作用する外力と仮定し、図-2に示す支圧板を有するアンカー杭の軸対称FEM解析モデルを用いてアンカー杭および周辺地盤の応答解析を行う。アンカー杭の長さ L は5m、直径 ($2r_0$) は0.5m、支圧板の厚さ h は0.1mであり、アンカー杭の半径 r_0 に対する支圧板の半径 a の比 $a/r_0=1, 2, 3$ および4とした場合について応答を求める。また、図中の番号は節点番号であり、これらの点における変位および間隙水圧の応答について調べる。

海底地盤に対する計算条件としては、土木学会(1994)編の『海岸波動』で用いられている値を参考として、表-1に示す諸定数等を用いる。

表-1 各種地盤に対する諸定数

	密実な質土	シルト	正規圧密粘土	過圧密粘土
単位体積重量 (kN/m ³)	19.61	17.65	17.65	19.61
弾性係数 (kN/m ²)	3.6×10^4	7.65×10^4	7.65×10^4	2.04×10^4
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3
透水係数 (m/s)	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

なお、アンカー杭については、単位体積重量 25 kN/m^3 、弾性係数 $4.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ およびポアソン比 0.1 とする。また、アンカー杭の杭頭に作用する潮位変動による箱型浮体の浮力変動外力は1本の杭頭当たり20kNの振幅を有するを周期的な正弦波と仮定し、1周期を20ステップに分割して応答計算を行う。

3. 解析結果および考察

本研究では、上述した4種類の海底地盤における透水係数およびアンカー先端の支圧板の直径の違いがアンカー

杭の杭頭変位およびアンカー杭先端における支圧板周辺地盤の間隙水圧の応答特性に及ぼす影響について調べる。なお、それぞれの地盤におけるアンカー杭の圧密沈下や支圧板周辺地盤の過剰間隙水圧の消散等についても調べる。次いで、地盤を Cam-clay モデルと仮定した場合のアンカー杭周辺地盤の弾塑性非排水解析を行い、周辺地盤の応答特性を調べる。

(1) 弾性解析について

図-3は4種類の地盤について、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=4$ の場合における杭頭の変位応答を潮位変動1周期について示したものである。表-1に示されている諸定数等から明らかなように、密な砂層に対する変位が一番小さく、シルトおよび正規圧密粘土に対するものが大きな応答値となっている。

図-4は正規圧密粘土について、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比を $a/r_0=1, 2, 3$ および4とした場合における変位応答を示したものである。この図より、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 a/r_0 が大きく

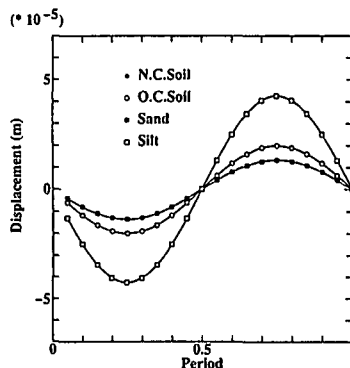


図-3 各種地盤における杭頭の変位応答 ($a/r_0=4$)

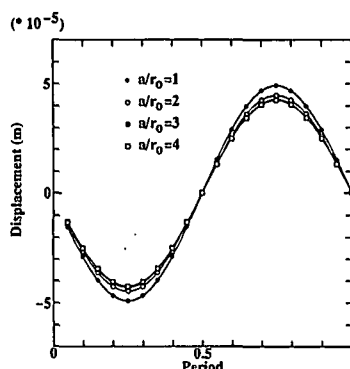


図-4 a/r_0 と杭頭の変位応答の関係 (正規圧密粘土)

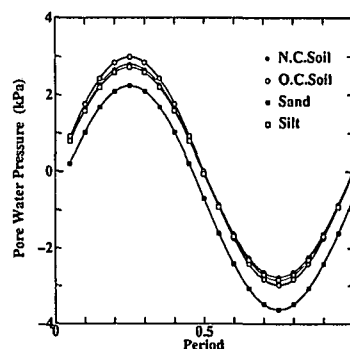


図-5 間隙水圧応答 (No. 15, $a/r_0=4$)

なるにつれてアンカー杭の杭頭変位は小さくなっていることがわかる。

一方、図-5は4種類の地盤について、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=4$ の場合における支圧板直下の No. 15 の間隙水圧応答を潮位変動 1 周期について

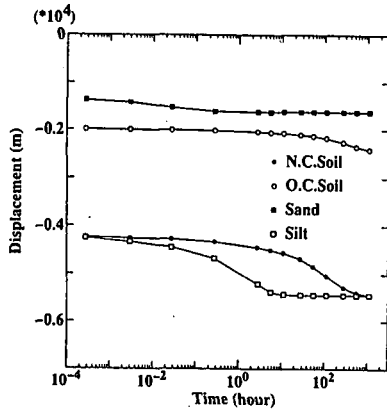


図-6 圧密による杭頭の変位応答 ($a/r_0=4$)

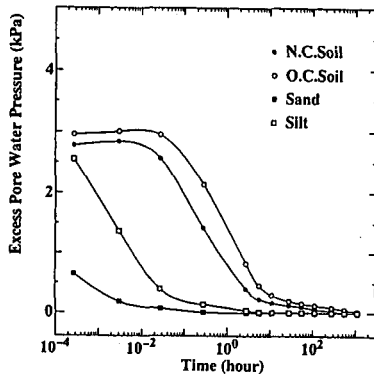
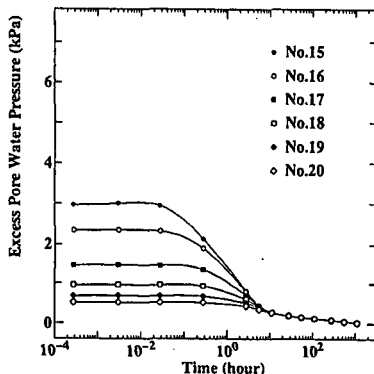
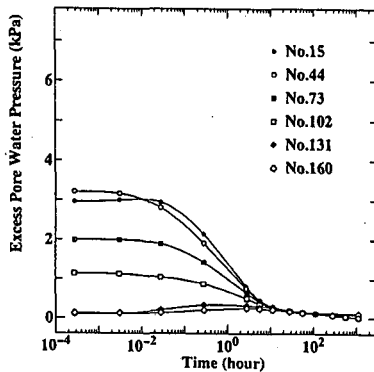


図-7 過剰間隙水圧の消散 (No. 15、 $a/r_0=4$)



(a) No. 15~20



(b) No. 15, 44, 73, 102, 131, 160

図-8 過剰間隙水圧の消散 (過圧密粘性土、 $a/r_0=4$)

て示したものである。この図より、周期的な潮位変動による浮力がアンカー杭の杭頭に作用しているため、砂質土以外の3種類の地盤については、圧縮力を受けた場合も引張り力を受けた場合もほぼ同じ程度の間隙水圧値となっている。しかしながら、砂質土においては、圧縮力を受けた場合に発生する杭先端の支圧板直下に発生する間隙水圧の応答値 (ステップ5に相当) に比べて、引張り力を受けた場合の間隙水圧の応答値 (ステップ15に相当) は符号が逆になっているものの、絶対値としてかなり大きな値となっていることがわかる。つまり、干潮時の間隙水圧に比べて満潮時における間隙水圧が大きくなっている。

次に、潮位変動の周期は数十時間と長いため、アンカー杭の圧密沈下量について調べる。

図-6は、最大振幅の変動外力を杭頭に作用させた場合 (ステップ5) における過剰間隙水圧の消散に伴う杭頭変位の時間変化を示したものである。また、その時における図-2に示す支圧板直下に位置する No. 15 の過剰間隙水圧の消散変動を図-7に示しておく。これらの図より、密な砂質土および過圧密粘性土におけるアンカー杭の杭頭変位は時間の経過とともに圧密沈下が見られるものの、地盤の弾性係数が大きいため、シルトや正規圧密粘性土に比べて圧密変位量は小さいことがわかる。また、図-7に示す過剰間隙水圧の消散過程から明らかなように、砂質土については過剰間隙水圧の消散に伴い、早めに最終沈下量に達していることがわかる。次いで、シルト、正規圧密粘性土および過圧密粘性土の順に、過剰間隙水圧の消散に時間を要していることがわかる。

図-8は過圧密粘性土においてアンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=4$ とした場合の支圧板周辺地

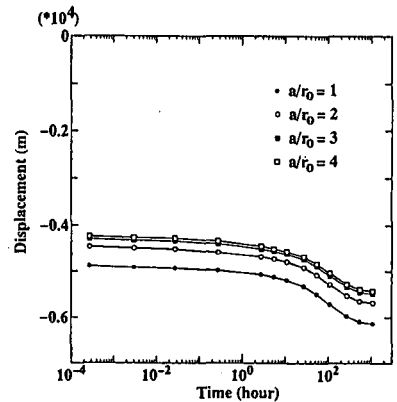


図-9 a/r_0 と圧密による変位応答 (正規圧密粘性土)

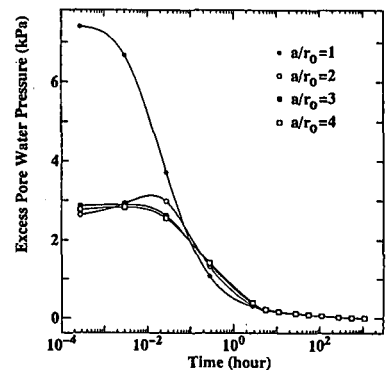
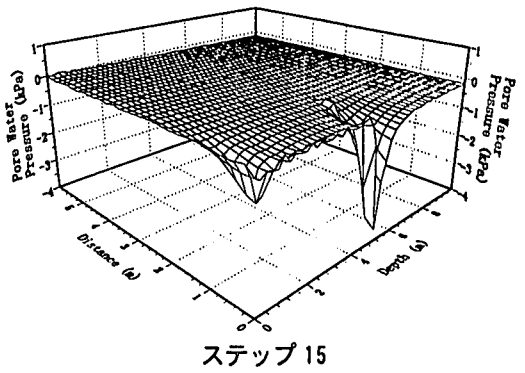
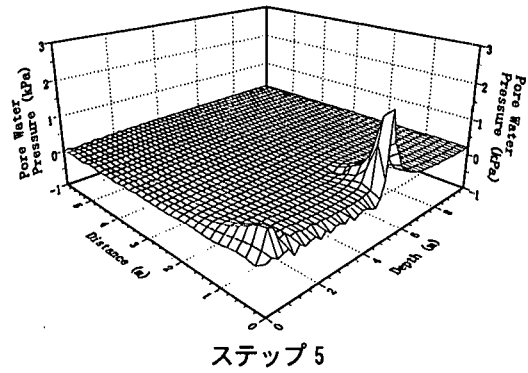


図-10 a/r_0 と過剰間隙水圧の関係 (正規圧密粘性土)

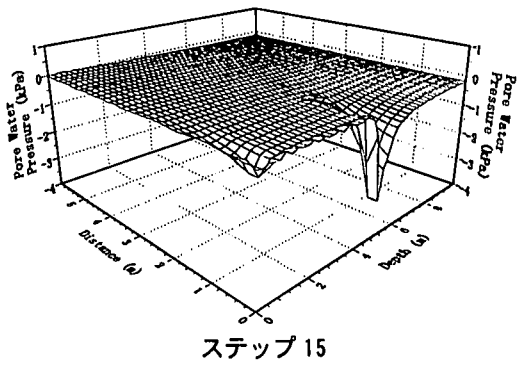
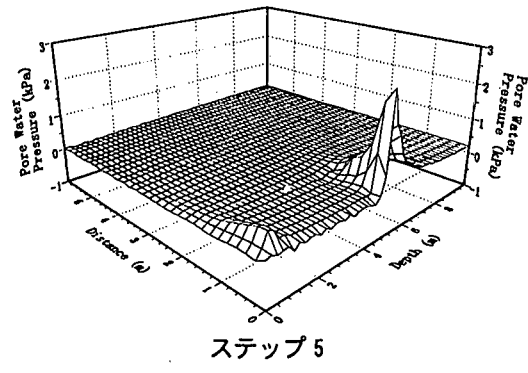
盤の No. 15～20、44、73、102、131 および 160 の 11 地点の過剰間隙水圧の時間変化を示したものである。これらの図より、支圧板から離れるにつれて発生する過剰間隙水圧は小さくなっており、図-7に見られたように、過剰間隙水圧は載荷後ほぼ 10 時間程度で消散していることがわかる。このことは、潮位変動の周期の観点より、透水係数の

小さい過圧密粘性土地盤などにおいては、過剰間隙水圧の消散過程に浮力による载荷を受ける場合には、さらに過剰間隙水圧の上昇につながる可能性があることを示唆しているものと考えられる。

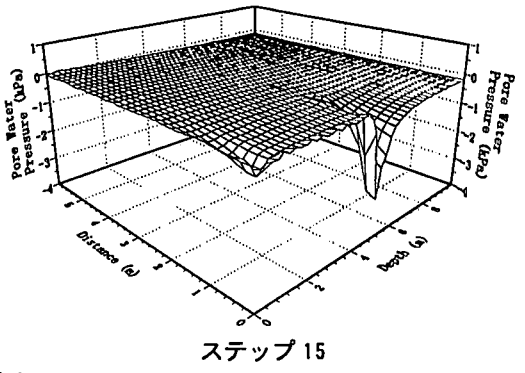
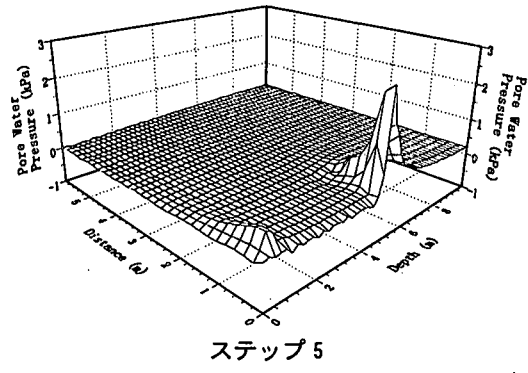
図-9 は正規圧密粘性土においてアンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=1, 2, 3$ および 4 とした場



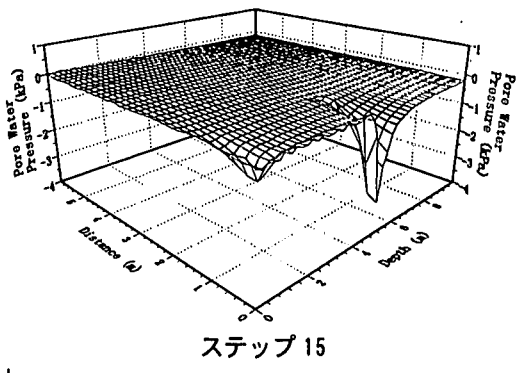
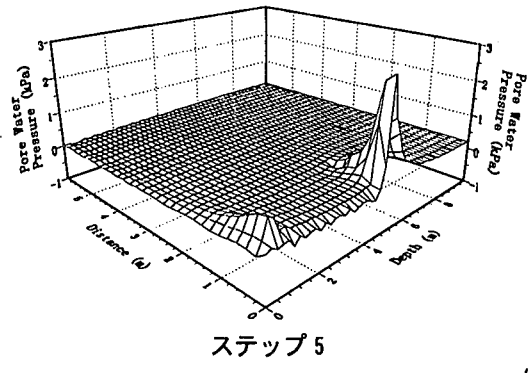
(a) 砂質土



(b) シルト



(c) 正規圧密粘性土



(d) 過圧密粘性土

図-11 各種地盤における干潮・満潮時の間隙水圧分布 ($a/r_0=4$)

合の圧密による杭頭変化を示したものである。載荷直後における杭頭変位量の差がそのまま圧密沈下後まで一定となっていることがわかる。

図-10 は正規圧密粘性土において、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=1, 2, 3$ および 4 とした場合の支圧板直下における No. 15 の過剰間隙水圧の時間変化を示したものである。この図より、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=1$ の場合には、他の $a/r_0=2, 3$ および 4 に比べてかなり大きな過剰間隙水圧が発生していることがわかる。このことは、アンカー杭の先端に支圧板あるいは拡大部分等を有する構造形式はストレート杭に比べて、過剰間隙水圧の発生を押さえる効果を有していることを示唆しているものと考えられる。

次に、アンカー杭の変位応答に影響を及ぼすと考えられる間隙水圧の分布特性について検討する。

図-11 はアンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=4$ の場合について、干潮および満潮時に相当するステップ 5 および 15 における 4 種類の地盤に対する間隙水圧分布を示したものである。これらの図より、ステップ 5 および 15 とともにアンカー杭先端における支圧板のみならず杭頭付近にも間隙水圧の発達域が見られる。また、アンカー杭の先端にある支圧板直下 No. 15 の間隙水圧の時間変化を示した図-5 から明らかなように、干潮時に相当するステップ 5 においては過圧密粘性土に対する支圧板周辺地盤の間隙水圧が 4 種類の地盤において最も大きく、また満潮時に相当するステップ 15 においては砂質土に対する間隙水圧が 4 種類の地盤において最も大きくなっていることがわかる。

ところで、図-12 は 1995 年 3 月 1 日から 1 ヶ月の間、

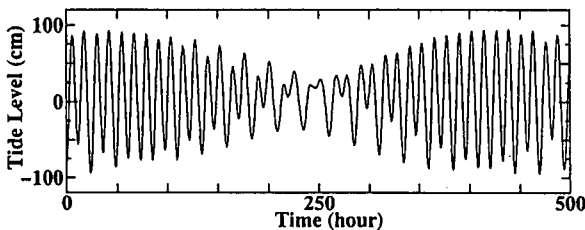


図-12 潮位変動記録(芝浦)

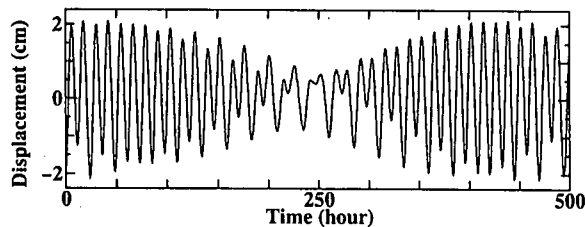


図-13 杭頭変位応答(正規圧密粘性土、 $a/r_0=4$)

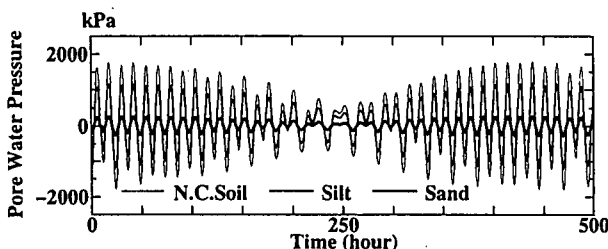


図-14 間隙水圧応答 (No. 15、 $a/r_0=4$)

芝浦において測定された潮位変動記録を示したものである。本研究では、図-12 に示される潮位変動記録に対して、前述したアンカー杭の杭頭変位および支圧板周辺地盤の間隙水圧応答を調べる。

図-13 は正規圧密粘性土およびアンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=4$ の場合について、図-12 に示す潮位変動に対するアンカー杭の杭頭変位応答を示したものである。なお、箱型浮体構造物の寸法を $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ の立法体と仮定し、喫水を箱型浮体の 1.5m 位置において応答計算を行った。この図より明らかなように、アンカー杭の杭頭変位応答は図-12 に示す潮位変動と同じ波形をしていることがわかる。これは、図-3 に示した周期的な潮位変動に対する杭頭変位応答からも推測できる応答結果となっている。

一方、図-14 は図-12 に示す潮位変動に対してアンカー杭先端の支圧板直下における No. 15 の間隙水圧応答を砂質土、シルトおよび正規圧密粘性土について示したものである。図-7 に示す 4 種類の地盤における過剰間隙水圧の時間変化からも明らかなように、砂質土に対する間隙水圧応答は正規圧密粘性土やシルトに比べてかなり小さな間隙水圧値となっており、透水係数が大きいため、潮位変動に見られる振幅の変動の影響をあまり受けず、ほぼ一定振幅の間隙水圧応答となっていることがわかる。

(2) Cam-clay モデルを用いた弾塑性非排水解析

上述のアンカー杭および周辺地盤の応答解析結果より、潮位変動が激しい海域に建設されるアンカー杭の周辺地盤においては、干満時間を周期とした正負の過剰間隙水圧が常に発生する。この現象を地盤側から考えれば、圧縮と膨張の過程が交互に繰り返されることになり、繰り返しの地盤強度変化が問題となる。

そこで、本研究では Roscoe ら (1963) が提案した Cam-clay モデルを用い、弾塑性体と仮定した地盤に設置された先端拡大杭の周辺地盤の応力状態を荷重載荷段階毎に調べた。地盤内部の応力状態として、ひずみ硬化および軟化を含めた降伏状態を 1 周期分の潮位変動における各ステップ毎に調べるために、1 次元状態で正規圧密された粘性土地盤を想定し、この地盤に設置された支圧板を有するアンカー杭の杭頭に圧縮および引張の潮位変動による外力が作用した場合の各ステップ毎の地盤内部の状態を解析した。また、非排水解析に用いたメッシュ図は図-2 に示すものと同じものを用いた。

Cam-clay モデルの諸定数は以下の値を用いた。

粘性土の飽和湿潤密度 20 kN/m^3 、水の密度 10 kN/m^3 、 K_{nc} (正規圧密曲線) $= 0.613$ 、 $M = 0.888$ 、深さ 10 m 地点での鉛直応力 200 kPa 、主応力差 $q = 38.7 \text{ kPa}$ 、平均有効応力 $p' = 74.2 \text{ kPa}$ 、先行圧密応力 $p_c' = 133.5 \text{ kPa}$ 、膨潤指数 $\kappa = 0.062$ 、圧縮指数 $\lambda = 0.161$ 、 $\Gamma = 2.759 (= 1 + e)$ 、有効ポアソン比 $\nu' = 0.25$ 、水の等価弾性係数 $K_w = \alpha K'$ の算定のため $\alpha = 100$ 、土の体積弾性係数 $K' = (1 + e) p' / \kappa$

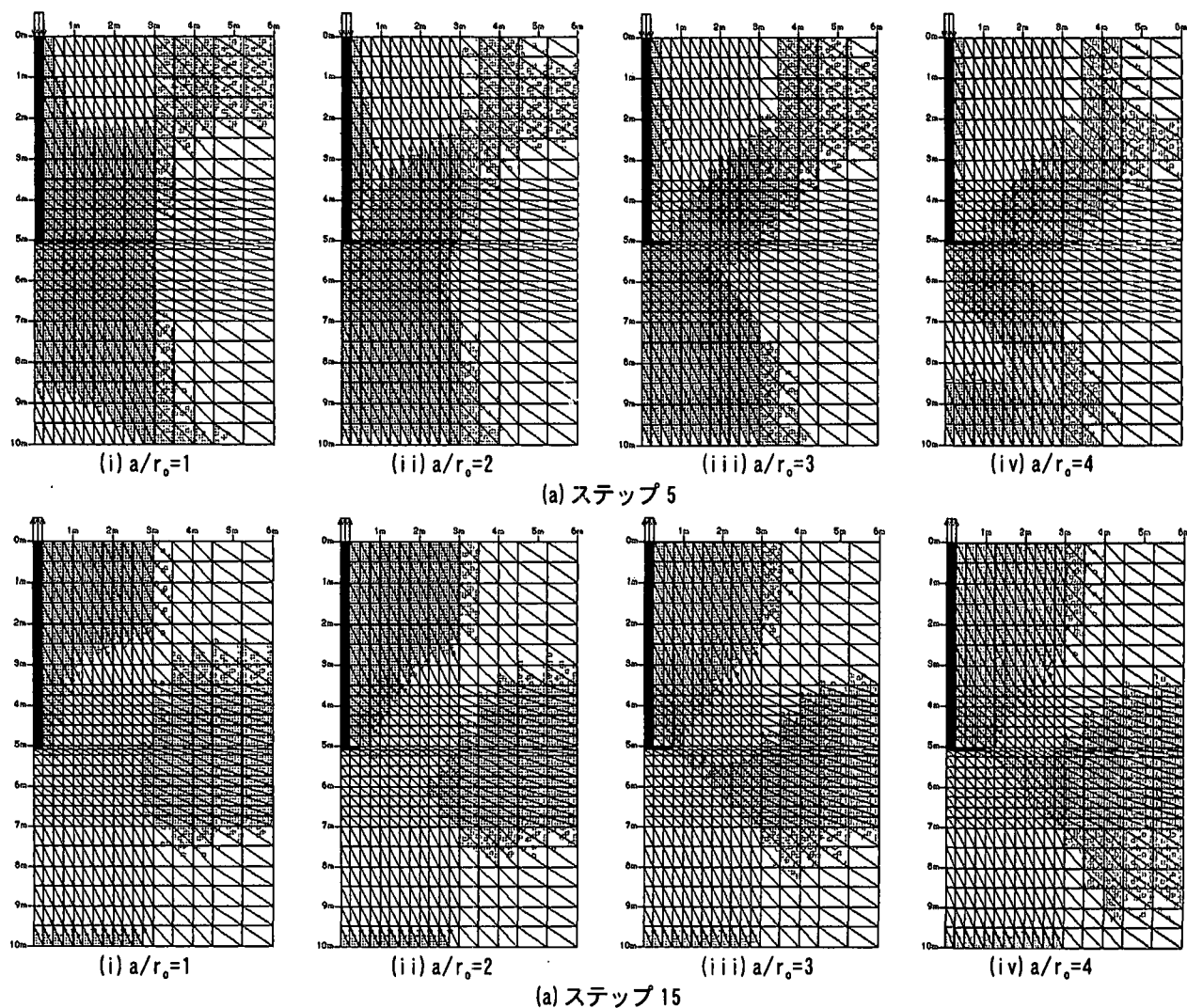


図-15 地盤の降伏状態

図-15 は、アンカー杭の半径に対する支圧板の半径の比 $a/r_0=1, 2, 3$ および 4 とした場合において、干潮および満潮時に相当するステップ5および15における地盤内部の降伏状態に至っている領域を色の濃淡により示したものである。圧縮力が作用するステップ5においては、 a/r_0 が大きくなるにつれて、アンカー杭周辺地盤のひずみ硬化域が支圧板によって分散させられている様子がわかる。一方、引張力が作用するステップ15については支圧板によってひずみ硬化領域が増加していることが認められる。したがって、潮位変動によって両者の荷重による降伏状態を繰り返すことになるため、杭周辺地盤の応答特性を考慮した杭基礎の設計を行う必要がある。

4. おわりに

本研究では、軟弱地盤における圧密沈下や弾塑性変形を考慮することができる有限要素法を用いて、海底地盤の透水係数およびアンカー先端の支圧板の直径の違いがアンカー杭および周辺地盤の変位、間隙水圧の応答特性に及ぼす影響について調べた。その結果、粘性土地盤におけるアンカーは繰り返しの潮位変動外力を受けるため、過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下が起きる。また、砂質土地盤の透水係数はシルトおよび粘性土地盤の透水係数に比べて

大きいと、潮位変動外力によってアンカー杭周辺地盤に生じる過剰間隙水圧は小さくなることがわかった。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究補助金 基礎研究(C) (研究代表者:高谷富也、課題番号:09650558) の補助を受けて遂行されたことを付記し、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 土木学会 (1994) : 海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用的解析法】 , p. 520.
- 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, No. 2, pp. 966-970.
- 前野賀彦・高谷富也・西野好生・安井章雄 (1995) : 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, 海岸工学論文集, 第42巻, No. 2, pp. 971-975.
- 前野賀彦・児玉洋介 (1995) : 既成杭による地中拡底杭, 特願平 7-78405.
- 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.
- Roscoe, K. H., A. N. Schofield and A. Thrairajah (1963) : Yielding of clays in states wetter than critical, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 211-240.