

先端拡底杭の沿岸域への適用に関する一考察

On Application of Pile with Expanding End to Offshore Structure

前野賀彦^{*}・高谷富也^{**}・高橋重雄^{***}・下迫健一郎^{***}

Yoshi-hiko Maeno, Tomiya Takatani, Shigeo Takahashi and Ken-ichiro Shimosako

The response of an offshore structure resting on pile foundation against waves was evaluated by FEM analysis in order to investigate a feasibility of a pile with expanding end to offshore structure foundation. The caisson structure was assumed to be a linear elastic solid and also the soil was assumed to be a linear elastic medium for a normal consolidation soil. The displacement and pore water pressure around pile foundation were numerically estimated from the view points of the number of piles, the distance between piles and the connectivity between caisson structure and pile foundation. Such pile foundation prevents the excess pore water pressure beneath the caisson structure. The connection between caisson and piles is considerable with uneven sinking and rocking.

Key words: pile with expanding end, caisson structure, displacement, pore water pressure

1. はじめに

沿岸部の埋め立て地だけでなく大河川河口部や湾内などでは軟弱地質が相当厚く堆積している場合が認められる。これらの軟弱堆積層を伴う沿岸域では、従来より構造物基礎として杭基礎が用いられているが、N値が砂質土で30以上・粘性土で20以上の良質な支持層が得られない場合であっても、摩擦杭として打ち込み杭・場所打ち杭共に適用可能であることは知られているところである。他の方法として先端拡底杭の中間層への適用が考えられ、拡底部において上載荷重に対して十分な支持力が得られれば、杭基礎の適用範囲は広がるものと考えられる。このような背景から、前野・児玉(1996)は拡底部に鉄骨・鉄筋を配することにより、上載荷重を拡底断面で支持することができる工法を提案している。このような施工法を実用化するためには、実地盤での現場载荷試験によりその適用性を確認することも重要であるが、地盤条件が個々のケースで異なりその一般化には载荷試験の積み重ねが必要であり経済的な困難が伴う。そのため、得られた現場载荷試験結果を生かしながら、多様な各種地盤についてシミュレーションを行う必要がある。長尺杭の場合や支持層上に比較的軟弱な層が広がっている場合には、地盤の塑性変形を考慮した解析を行う必要がある。そこで、従来より軟弱地盤の沈下予測に用いられている有限要素法を用いた杭およびその周辺地盤の変位および間隙水圧の応答解析を行い、軟弱地盤への先端拡底杭の適用に関する検討を行ったものである。

波は壁体に対して直角に入射し重複波が形成されるものとし、海底地盤については二次元平面ひずみ状態として解析を行う。

図-1は杭基礎上に設置されたケーソン壁体モデルを示したもので、図-1(a)は杭頭部とケーソン壁体が連結された場合を示している。なお、『港湾の施設の技術上の基準・同解説』には杭頭部を捨て石層で覆った後にケーソン壁体を設置するように指示されているため、図-1(b)に示すモデルの解析も併せて行う。以下、本研究では、図-1(a)および(b)に示すモデルをそれぞれ“Type A”および“Type B”と呼び、杭基礎を用いない場合のケーソン壁体モデルを“Type C”と呼ぶことにする。

本研究では、図-1に示すケーソン壁体モデル前面に作用する周期的な入射波による波圧外力に対するケーソン壁体および杭基礎周辺地盤の変位および間隙水圧の応答特性を明らかにする。なお、ケーソン壁体下の杭基礎モデルとして、図-1に示すように先端拡底杭を横方向に5本、

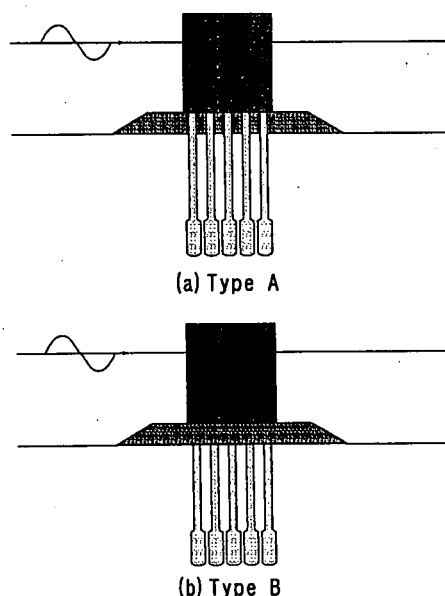


図-1 ケーソン壁体モデル

2. 解析手法

本研究では、軟弱地盤における先端拡底杭基礎の応答特性の検討を行う際、その上部構造としては、ケーソン壁体を考え、軟弱地盤に群杭基礎を設け、その上にケーソン壁体の設置を想定する。また、ケーソン壁体の解析に際して、

* 正会員 日本大学短期大学部 建設学科
(〒274 船橋市習志野台7-24-1)

** 正会員 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

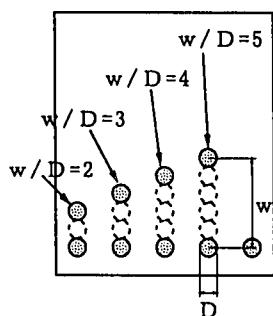


図-2 杭配置間隔 w/D

3本および2本設置した3つのモデルを仮定する。また、ケーソン壁体解析は二次元解析のため、奥行き方向への杭配置を考慮するために、図-2に示すように杭配置間隔 w/D (w : 杭間隔、 D : 杭直径) パラメータを用いて三次元効果を導入し、 $w/D=2, 3, 4$ および 5 の4つの場合に対して応答を求める。さらに、杭基礎として、先端拡底杭および拡底部を有しない通常の杭の2つの場合に対する検討も併せて行うことにする。

図-3はケーソン壁体および周辺地盤を含む有限要素法による解析領域を示したものである。ケーソンの寸法は高さ5.6m、幅5mであり、先端拡底杭は直径0.5m、長さ8.2m、拡底部の長さ2m、拡底部直径0.8mである。本研究では、図-3(b)に示されるいくつかの地点における変位、

間隙水圧応答および斜線部分の間隙水圧分布を調べる。また、ケーソン壁体、捨て石層および海底地盤に対する計算条件としては、『海岸波動』で用いられている値を参考として、以下に示す諸定数等を用いた。

ケーソン壁体：

せん断弾性係数 $4.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 0.1、
単位体積重量 25 kN/m^3

捨て石層：

せん断弾性係数 $3.06 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 0.3、
単位体積重量 19.6 kN/m^3 、間隙率 0.394、
透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

海底地盤：

せん断弾性係数 $7.65 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 0.3、
単位体積重量 17.7 kN/m^3 、間隙率 0.543、
透水係数 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

なお、通常、捨て石層には剛性および透水係数が大きな材料が用いられたため、その層内の変形や間隙水圧の発生も小さいと考えられるが、本研究では捨て石層の間隙への土粒子の入り込み等を考慮して、捨て石層は砂層と同程度の土質諸定数をとるものとし、海底地盤は粘性土層と仮定した。また、入射波の波高は1m、周期は10s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。

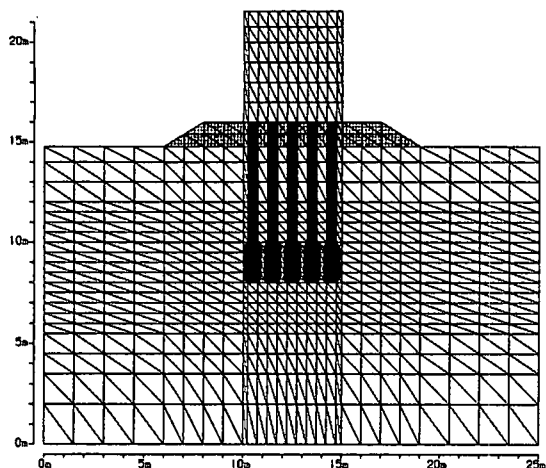
3. 解析結果および考察

(1) 変位応答について

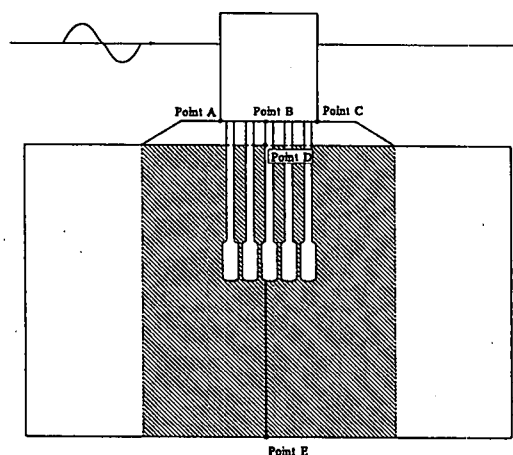
図-4は、ケーソン壁体下横方向の杭配置が5本、奥行き方向の杭配置間隔 $w/D=4$ の場合について、Type A、Type BおよびType Cに対するケーソン壁体底部のA、BおよびCの3地点(図-3(b)参照)における変位応答の時間変化を壁体前面に作用する波の1周期分について示したものである。この図より明らかなように、図-4(c)に示されるケーソン壁体下に杭基礎を用いないType Cに対する変位応答がType AおよびType Bに比べて大きな変位応答を示している。また、いずれの地点における変位応答もケーソン壁体の前面に作用する波の位相と連動しており、壁体前面下のA点の変位応答が最も大きな変動を示し、ケーソン壁体後方底部におけるC点の変位応答が小さくなっていることがわかる。

図-5は奥行き後方の杭配置間隔 $w/D=4$ の場合について、ケーソン壁体下横方向に設置する杭本数をパラメータにしてケーソン壁体底部のA点およびC点の変位応答を示したものである。なお、ケーソン壁体と杭基礎との接続状態は連結されたType Aとしている。また、図中には杭基礎を用いないType Cの場合も併せて図示しておいた。この図より、ケーソン壁体下面下に配置された杭本数が増えるにつれて、壁体前方底部におけるA点の変位応答は小さくなっているが、壁体後方底部におけるC点の変位応答には杭本数の影響は顕著に現れていないことがわかる。これは、図-4からも明らかなようにケーソン壁体後方の変位応答は小さいため、杭本数の違いによる影響は顕著なものとなって現れないためと考えられる。

図-6は、ケーソン壁体下横方向に杭を5本配置した場



(a) 解析領域



(b) 応答評価点および領域

図-3 ケーソン壁体の解析モデル

合について、奥行き後方の杭配置間隔 w/D をパラメータにしてケーソン壁体底部の A 点の変位応答を示したものである。なお、ケーソン壁体と杭基礎との接続状態は Type A としている。この図より、ケーソン壁体の奥行き方向の杭配置間隔 w/D の違いによるケーソン壁体の変位応答への影響は小さいことがわかる。このことは、図-5 からも明らかなように、 $w/D=2\sim5$ の範囲では、ケーソン壁体に杭基礎を設置する場合には奥行き方向への杭配置間隔よりも、ケーソン壁体下横方向の杭本数がケーソン壁体の変位応答に顕著に影響することを示唆しているものと考えられる。

図-7 は奥行き後方の杭配置間隔 $w/D=4$ の場合について、杭先端における拡底部の有無によるケーソン壁体底部における A、B および C の 3 地点の変位応答を示したもので、ケーソン壁体下横方向の杭本数は 2、3、および 5 本としている。これらの図より、杭先端における拡底部の

有無による壁体底面における 3 地点の変位応答への影響は小さく、壁体後方へ行くにしたがってその差異は無くなっていることがわかる。

以上より、先端拡底杭をケーソン壁体の基礎として用いた場合の壁体周辺における地盤変位は、杭基礎を用いない場合に比べて小さくなるが、杭頭とケーソン壁体との接続に関係なく、壁体付近の地盤と杭先端部周辺における地盤変位量はほぼ同じものとなることがわかった。また、杭先端における拡底部分の有無による変位応答への影響はあまり顕著なものとなって現れていない。しかしながら、潮位変動が激しい海域や波浪などの海象条件が厳しい地域への適用を考える場合には、先端拡底杭は支持杭としての機能のみならず引張り外力に対して拡底部の支圧効果が期待できるものと考えられるため、その変位応答は小さくなるものと推察される。

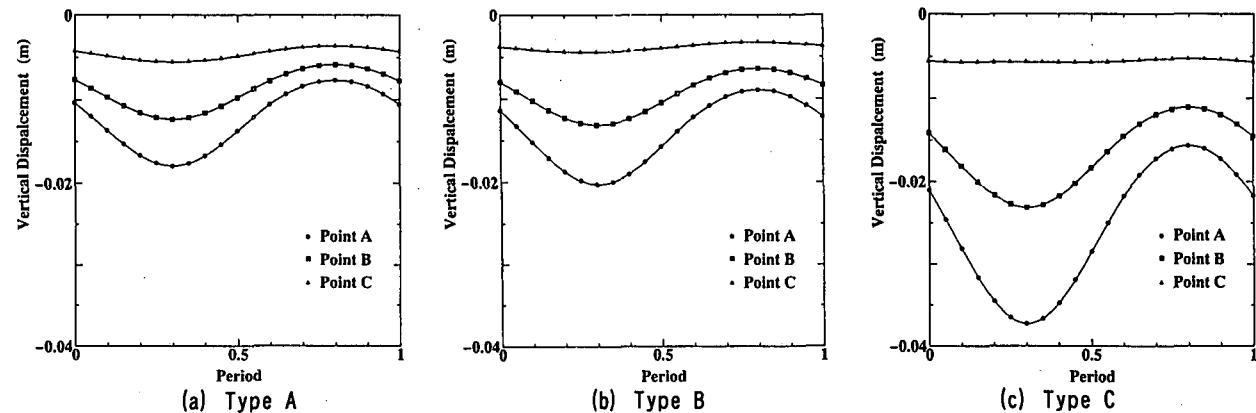


図-4 ケーソン壁体底面の変位応答 ($w/D=4$)

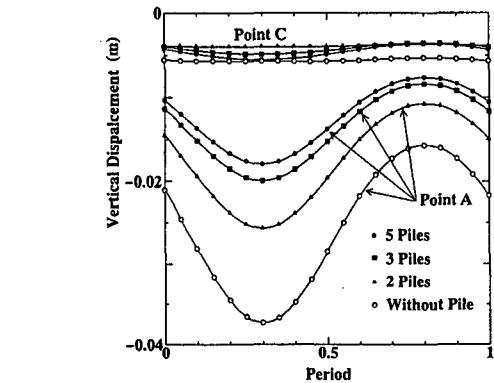


図-5 杭本数の違いによる変位応答 (Type A、 $w/D=4$)

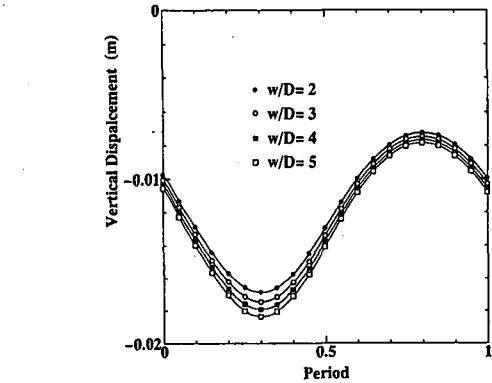


図-6 杭配置間隔と変位応答の関係 (Type A、 $w/D=4$)

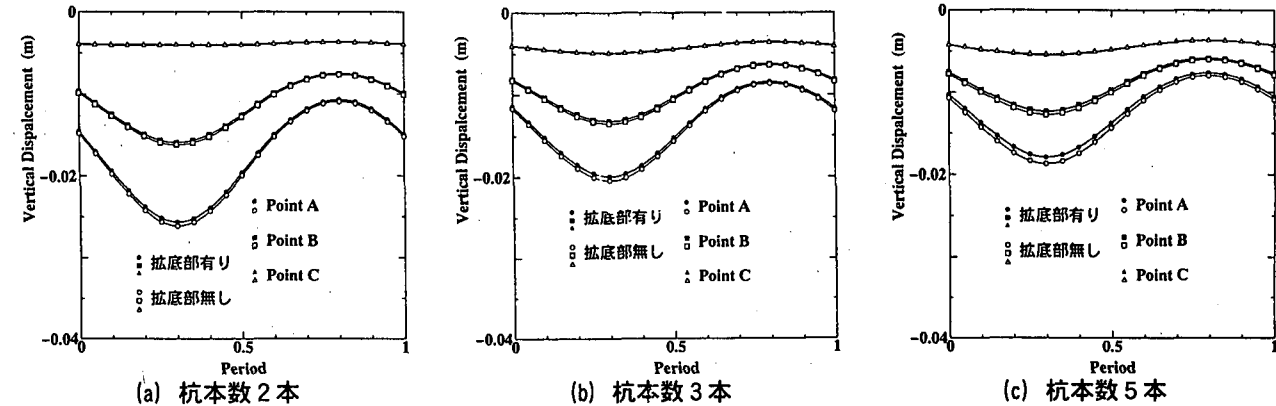


図-7 杭先端の拡底部の有無による変位応答 ($w/D=4$)

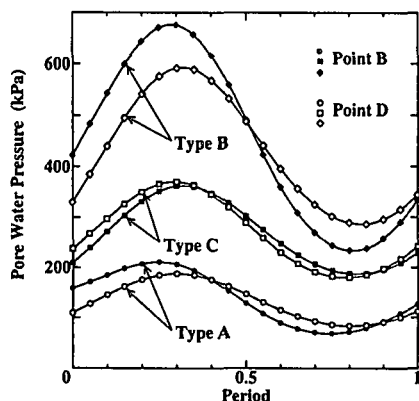


図-8 間隙水圧応答 ($w/D=4$)

(2) 間隙水圧応答について

図-8は、ケーソン壁体下横方向に杭を5本配置し、奥行き方向の杭配置間隔を $w/D=4$ とした場合について、ケーソン壁体と杭基礎との各接続状態毎に壁体底面のB点およびD点における間隙水圧応答を示したものである。この図より明かなように、ケーソン壁体の下に捨て石層を設置し、杭頭との接続をしないType Bにおける間隙水圧が他のものに比べてかなり大きな応答値を示していることがわかる。また、ケーソン壁体と杭頭との接続をしたType Aにおける応答値は杭基礎を用いないType Cに比べて小さな応答値となっている。このため、ケーソン壁体底部に杭基礎を用いた施工を行う場合には壁体と杭頭との接続を行う場合が間隙水圧応答の面からは有効であると考えられる。ところで、何れの接続状態においても壁体底

面から離れるにつれて間隙水圧応答の位相の遅れが認められる。

図-9は先端掘底部部分における間隙水圧応答が最大および最小となるステップ8およびステップ18について、図-3(b)に示すD点からE点に至る太線に沿う杭周辺地盤の間隙水圧応答をType A、Type BおよびType Cに対して示したものである。この図より、杭基礎を用いないType Cについては、捨て石層から離れるにつれて徐々に間隙水圧応答が小さくなっていることがわかる。また、杭基礎を用いた場合には、Type AおよびType Bともに杭先端掘底部ではかなり大きな負の間隙水圧応答を示している。一方、杭先端に掘底部を有しない杭周辺の間隙水圧応答を示した図-10においては、図-9(a)に示す間隙水圧応答と比べて掘底部付近では負の間隙水圧応答値が小さくなっており、両者における間隙水圧応答値の差異は掘底部付近に顕著なものとなって現れていることがわかる。したがって、杭基礎を用いたType Aの場合、杭の掘底部付近には顕著な間隙水圧の発達域が見られものの、図-9(c)に示す杭基礎を用いないType Cの場合と比較して壁体底面付近に生じる間隙水圧を抑える効果を有していることがわかる。

図-11はType Aの場合において図-3(b)に示す斜線部分の領域における間隙水圧分布をステップ8および18について示したものである。なお、同図中には、負の応答値を示す杭先端掘底部付近の間隙水圧分布を検討するために、各ステップ毎に視点を変えた間隙水圧分布を示しておいた。この図より、何れのステップにおいても壁体前面下に当たる水平距離10m付近の杭周辺ほど、かなり大き

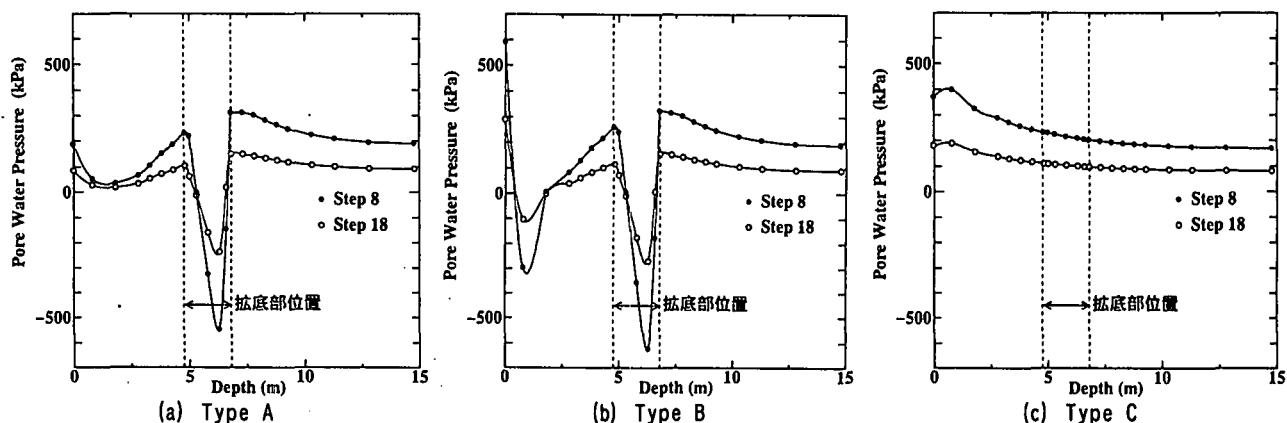


図-9 杭周辺地盤の間隙水圧応答 ($w/D=4$)

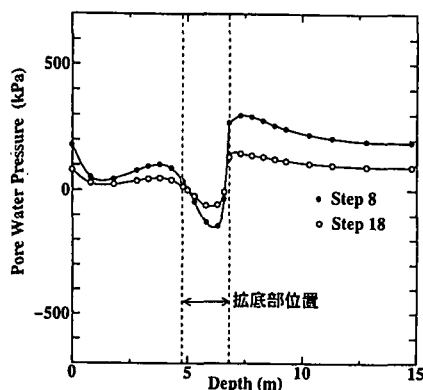


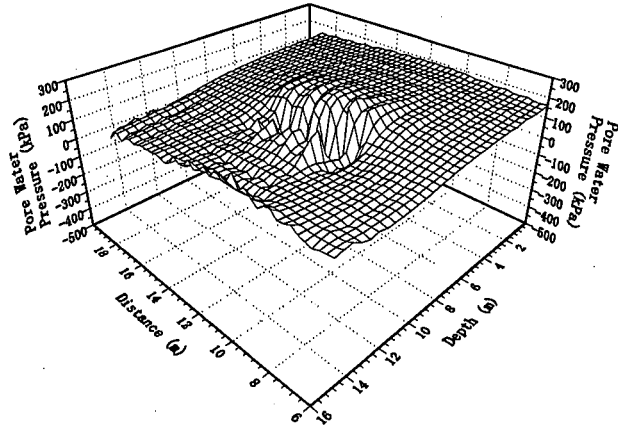
図-10 掘底部を有しない杭周辺地盤の間隙水圧応答 (Type A, $w/D=4$)

な間隙水圧応答値を示していることがわかる。また、壁体後方に向かって負の間隙水圧は急激に小さくなっている様子が視覚的に見て取れる。

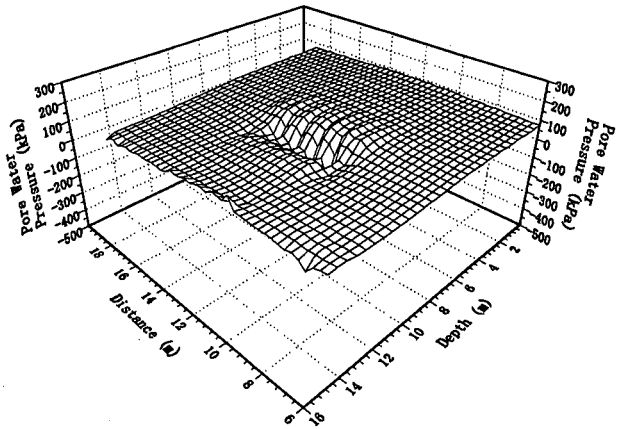
一方、図-12はType Bの場合において図-3(b)に示す斜線部分の領域における間隙水圧分布をステップ8および18について示したものである。図-11の場合と同様に、ケーソン壁体前面に近い杭ほどかなり大きな間隙水圧応答値を示しており、壁体後方に向かって負の間隙水圧は急激に小さくなっていることがわかる。一方、Type Bではケーソン壁体と杭頭の接続が無い場合、図-9(b)において見られたようにかなり大きな間隙水圧応答値を示していることがわかる。これは、図-10に示す掘底部を有

しない杭先端付近における間隙水圧の発達状況と同じ様相を呈しており、杭基礎をケーソン壁体下に設置する場合には、杭頭とケーソン壁体との接続を行う Type A の方が Type B に比べて、間隙水圧応答の観点からは有効であることがわかる。

図-13 は、ケーソン壁体下に杭基礎を用いない Type C の場合において、図-3 (b) に示す斜線部分の領域における間隙水圧分布をステップ 8 および 18 について示したものである。図-9 (c) における間隙水圧応答からも明らかに、捨て石層から離れるにつれて徐々に応答値が小

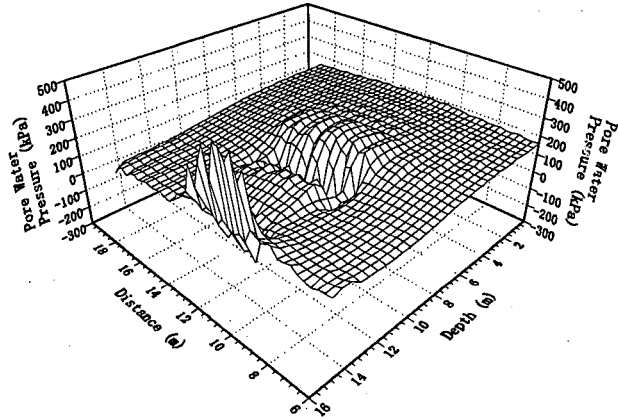


(a) ステップ 8

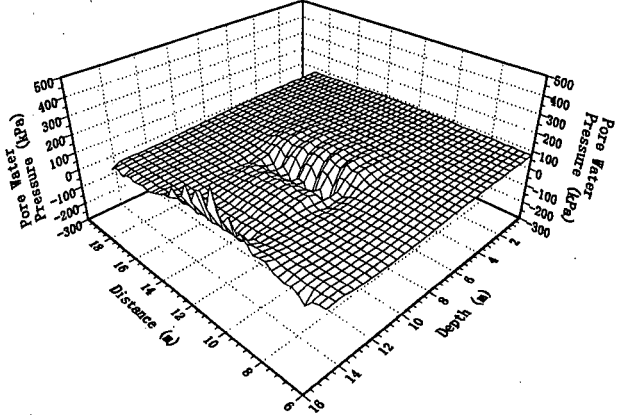


(b) ステップ 18

図-11 間隙水圧分布 (Type A、 $w/D=4$)



(a) ステップ 8



(b) ステップ 18

図-12 間隙水圧分布 (Type B、 $w/D=4$)

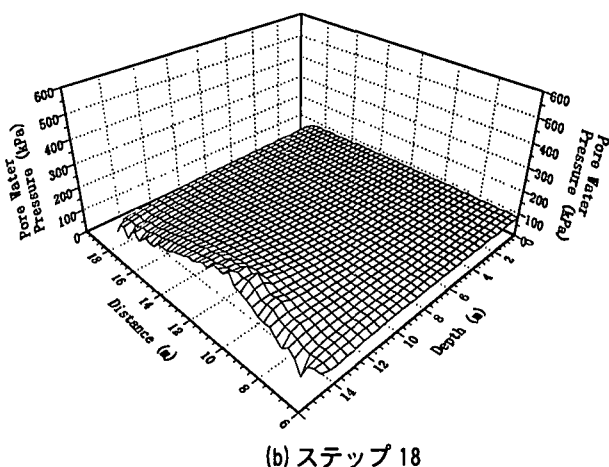
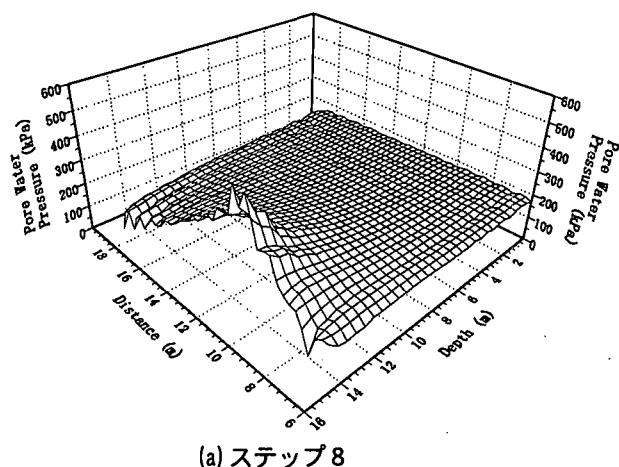


図-13 間隙水圧分布 (Type C, $w/D=4$)

さくなっていることがわかる。また、図-11、12 の場合と同様に、何れのステップにおいてもケーソン壁体前面に近い杭ほど大きな値となっており、壁体後方に向かって間隙水圧は小さくなっている。

4. おわりに

本研究は、先端掘底杭の軟弱地盤への適用を考え、従来より軟弱地盤の沈下予測等に用いられている有限要素法を用いて、先端掘底杭基礎上に設置されたケーソン壁体の応答解析を行い、壁体および杭基礎周辺地盤の変位、間隙水圧の応答特性の検討を行った。

以下に、本研究で得られた主な結論を述べておく。

- ① 先端掘底杭をケーソン壁体の基礎として用いた場合の地盤変位は杭基礎を用いない場合に比べて小さくなるが、杭頭とケーソン壁体との接続に関係なく、壁体付近の地盤と杭先端部周辺における地盤変位の沈下量はほぼ同じものとなる。
- ② 杭基礎を用いた場合、杭の掘底部付近には顕著な間隙水圧の発達域が見られる。したがって、杭基礎を用いることにより、海底地盤表面における間隙水圧の消散による沈下を抑えることができるため、壁体底面に空洞が生じる可能性が小さくなるものと考えられる。
- ③ 杭頭を捨て石層で覆いケーソン壁体との接続を行わない Type B の場合には、接続を行う Type A の場合および杭基礎を用いない Type C の場合に比べて、杭の存在により壁体底面付近に大きな間隙水圧の発達域が見られる場合があるので捨て石層に用いる地盤材料の諸条件に注意を要する。

ところで、本研究では、ケーソン壁体前面に作用する周期的な波力を仮定して、ケーソン壁体および杭周辺地盤の応答解析を行った。ケーソンの応答解析に関しては、既に、高谷・前野 (1995) はサクシンの効果を用いる直置きケーソンの周波数応答特性を用いて、波浪作用時のコンパートメントにより仕切られたスカート有するケーソンの基礎地盤の応答特性を検討している。また、運輸省港湾技術研究所の実験水槽において測定された壁体前面の波力分布 (前野、1995) に対するサクシンケーソンの応答特性

の検討を行っている。今後は、その際用いた壁体前面の波力がケーソン壁体や重力式係船岸等の構造物前面に作用した場合について検討する必要がある。

また、本研究により、間隙水圧の発達域やその消散過程は透水性を考慮に入れた従来の弾性理論に基づく解析により、十分変形予測が可能であることが明らかとなったが、施工過程を考慮に入れた応答解析に関しては、軟弱地盤の弾塑性変形を考慮した解析を行う必要がある。また、N 値が十分得られない中間層と呼ばれる層を杭の支持層とする場合や、支持層が得られても上層に比較的軟弱な層が広がっている場合には、地盤の塑性変形を考慮した設計が求められることから、塑性変形を考慮した解析を行う必要があるものと考えられる。さらに、波浪荷重のように水平方向の外力変動を受ける箱型ポンツーン等の海岸構造物の基礎構造物として、この種の杭を考える時、その適用域が砂層だけではなく、大河川河口部、沖または軟弱底質が相当厚く堆積した湾奥部などの場合には、軟弱層の塑性変形を考慮する必要があると考えられる。これらの課題については、現在検討中であり、稿を改めて報告する予定である。

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

- 社団法人日本港湾協会 (1989) : 港湾施設の技術上の基準・同解説, p. 77.
- 高谷富也・前野賀彦 (1995) : サクシンの効果を用いたケーソン構造物の周波数応答特性, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 375-380.
- 土木学会 (1994) : 海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】, p. 520.
- 前野賀彦・児玉洋介 (1995) : 既成杭による地中掘底杭, 特願平 7-78405.
- 前野賀彦・高谷富也・高橋重雄・下迫健一郎 (1995) : サクシンを考慮したケーソンの応答特性, 海岸工学論文集, 第 2 巻, No. 2, pp. 811-815.