

サクシヨンケーソン周辺地盤の応答特性

Dynamic Response of Seabed around Caisson Structure with Suction

高谷富也*・前野賀彦**・高橋重雄***・下迫健一郎***

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

The dynamic response of seabed around caisson structure with suction force acting between the bottom of caisson and seabed was numerically evaluated in the frequency domain by means of caisson structure-seabed interaction analysis already proposed by authors. In this paper, caisson structure was assumed to be a rigid rectangular prism with skirt, whose base has several square compartments and the suction force was to act on each compartment. While the seabed was assumed to be a fluid-saturated poroelastic medium whose behavior is governed by Biot's theory of wave propagation. The displacement and pore water pressure of seabed around caisson structure with suction force were numerically investigated under some conditions.

Key words: Caisson structure, Suction force, Frequency response of seabed

1. はじめに

沿岸域の開発に伴い埋め立て工事が盛んに行われており、施工性に優れ経済的な護岸・締め切り堤が望まれている。また、埋め立て対象海域が沖に展開するに従い設置水深が大きくなることやその基礎地盤の支持力が十分に得られない場合が生じることが想定される。具体的には、水深が大きい海域でケーソンのマウンドを施工する場合や軟弱地盤において覆砂や砂置換等の施工法を採用する場合にも経済性が低下することが知られている。そこで、施工時に貫入力を得ることにより施工性を高めることや、施工後に大気圧を遮断し引き抜き力に抵抗させることが可能であるサクシヨンの利用を考えた。まず、高谷・前野(1995)は、鋼ケーソンを対象として、その底部にコンパートメントを配置したスカートを設けることによりサクシヨンを発現させ、ケーソンの安定性を高めるモデルを示し、その周波数応答特性を検討した。さらに、前野ら(1995)は得られたケーソンの周波数応答特性に基づき、運輸省港湾技術研究所の実験水槽において計測したケーソン前面の波圧変動を用いて鋼ケーソンの変位応答解析を行った。それによれば、以下に示すように耐波性の上からサクシヨンの利用を肯定する結果が得られている。(1)サクシヨンケーソンはスカート部分に地盤反力が作用するため、従来の直置きケーソンに比較して変位応答が小さくなる。(2)ケーソン底面中央よりも端部のコンパートメントに大きなサクシヨンを作用させた場合、ケーソンの変位応答が小さくなるため、コンパートメントを設けることは耐波安定性に関して有効である。(3)地盤の透水係数が小さくなり、地盤の剛性が大きくなるに従って、ケーソンの変位応答は小

さくなる。しかしながら、サクシヨンケーソンの耐波安定性を検討するには、ケーソンの変位応答の検討のみでは不十分であり、ケーソン周辺地盤の変位・応力・間隙水圧応答特性の検討もまた必要である。

このような状況を踏まえて、本研究では、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に設置されたサクシヨンケーソンのスカート部分に作用する周面摩擦力を考慮したケーソンモデルを想定し、ケーソン底面中央に関するロッキング振動による変位応答を求めるとともに、周辺地盤における鉛直応力・せん断応力および間隙水圧分布の周波数応答特性を求める。地盤の透水係数、ケーソン底面に設けられたコンパートメントに作用させるサクシヨンの大きさの違いなどがケーソン周辺地盤の変位・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検討する。次いで、運輸省港湾技術研究所の実験水槽において計測したケーソン前面の不規則波圧変動を用いて、サクシヨンケーソン周辺地盤の実波浪を想定した不規則波に対する応答特性を検討する。

2. 解析手法

本研究では、サクシヨンケーソンの耐波安定性を調べる場合に重要となるケーソン周辺地盤の変位・応力・間隙水圧応答特性を調べ、ケーソンの耐波安定性に関する基礎資料を得る。このため、本節では、サクシヨンケーソンの変位応答解析を通じて、ケーソン構造物周辺における地盤の変位・応力・間隙水圧応答の解析手法について概説する。

図-1は、海底地盤に設置されたサクシヨンを受ける直置きケーソンの模式図を示したものである。ケーソン構造物として、幅および奥行き W 、高さ H の直方体を想定し、ケーソン底部に D なるスカート長を有する構造となっている。なお、本研究では、ケーソン構造物を剛体と仮定して、図-2に示すように y 軸回り

* 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

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室

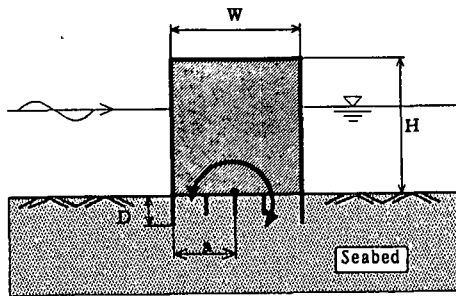


図-1 サクションケーソンの解析モデル

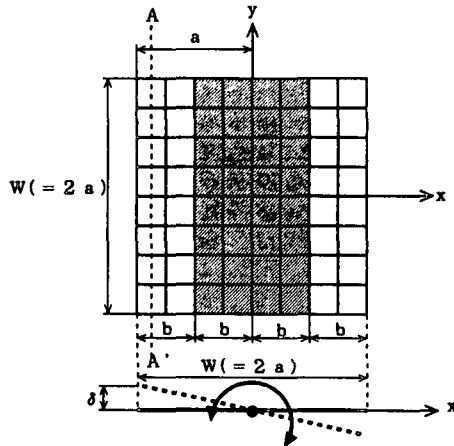


図-2 ケーソン底部のコンパートメント

のロッキング振動に対する動的変位応答解析を行い、このロッキング振動に伴うサクションケーソン周辺地盤の変位・応力・間隙水圧応答特性を求める。なお、サクションケーソンの沈設施工上の問題点である鉛直性を確保するため、ケーソン底面にはサクションを調整するための複数のコンパートメントが設けられている(続ら、1995)。既に、著者らはコンパートメントに作用させるサクションのタイプとして、図-2に斜線で示した幅 $2b$ の中央部分におけるサクションに対する斜線の無い端部における幅 b の部分のサクションの比 R_c を導入し、サクション比 R_c の違いがケーソン端部における A-A' 断面の変位応答に及ぼす影響についての検討を行い、サクション比 R_c が大きくなるにつれて、サクションケーソンの変位応答が小さくなり、耐波安定性に関して有効であることを報告している(前野ら、1995)。

ところで、図-1に示すようなケーソン構造物の応答解析を行う場合、サクションおよび周辺地盤とスカート部分との摩擦抵抗力の評価が問題となる。本研究では、前野ら(1993)のサクションアンカーに関する研究と同様に、ケーソン底部の各コンパートメントに作用させるサクションは、海底地盤として仮定した多孔質飽和弾性地盤に作用する等分布加振力を用いて評価を行う。一方、ケーソン底部周辺に設けられたスカート部分と周辺地盤との摩擦抵抗力については、多孔質飽和弾性地盤内部に作用するリング状ロッキング加振力を用いて評価を行う。

以下に、上述した2種類の加振力による変位解を用いたサクションケーソン変位およびケーソン周辺地盤の変位・応力・間隙水圧応答解析について説明する。

ケーソン底部のコンパートメント毎に作用させるサクション力およびスカート部分と海底地盤との摩擦抵抗力を考慮するため、図-2に示すようにケーソン底部のコンパートメント部分を有限個の要素に分割し、またスカート部分を有限個のリング要素に分割し、各要素内での等分布加振力およびリング状分布加振力を一定とし、影響係数の概念を用いて全要素の加振力による変位を重ね合わせる。

次に、等分布加振力が作用する各コンパートメント中央の変位および各リング要素の変位が、図-2に示されているようにケーソンの端部変位が δ となるような回転角を有するという条件のもとで、各コンパートメントに作用する鉛直等分布加振力および各リング要素に作用する等分布加振力を未知とする連立一次方程式が得られる。連立一次方程式を解いて得られる未知等分布加振力およびリング状分布加振力の合力がケーソン構造物に作用する全加振力に等しいという条件を用いれば、サクションケーソンの変位応答を求めることができる(高谷・前野、1995)。

一方、サクションケーソン周辺地盤における変位・応力および間隙水圧については、次式に示すように上述した解析方法によりサクションケーソンの変位応答を求めた際に得られるケーソン底面の (i, j) 要素に作用する等分布加振力 $\bar{q}_z(i, j)$ およびスカート部分の各リング要素 i (番目) に作用するリング状分布加振力 $\bar{q}_r(i)$ による変位・応力解を用いて容易に得ることができる。

$$v = \sum_{i=1}^{NX} \sum_{j=1}^{NY} G(r, z|i, j) \bar{q}_z(i, j) + \sum_{i=1}^M G(r, z|i) \bar{q}_r(i) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 v はサクションケーソン周辺地盤における変位・応力および間隙水圧であり、 $G(r, z|i, j)$ 、 $G(r, z|i)$ はそれぞれサクションケーソン底面の (i, j) 要素のコンパートメントに作用する単位等分布加振力およびスカート部分の i 番目の要素の単位リング状加振力による (r, z) なる位置の変位・応力および間隙水圧の影響係数である。また、 NX および NY はケーソン底面における x 方向および y 方向の分割数であり、 M はスカート部分における分割数である。なお、応力および間隙水圧解の詳細については、高谷ら(1992)の論文に譲る。

3. サクションケーソン周辺地盤の応答特性について

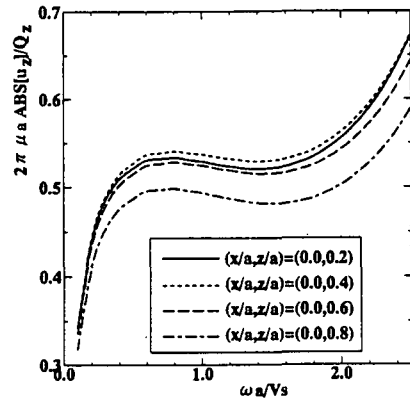
本節では、サクションケーソン周辺地盤の変位および間隙水圧の周波数領域における応答特性について述べ、続いて得られたケーソン周辺地盤の周波数応答に基づき、波圧実験より得られた波圧変動をケーソン前面に外力として作用させた場合のサクションケーソン周辺地盤の変位・間隙水圧応答を求める。

地盤条件としては飽和砂質土に対する諸弾性定数および密度等の数値 (Halpern・Christiano, 1987) を用いて、ロッキング振動を受けるケーソンの変位解析を行った。なお、ロッキング振動を受けるケーソン構造物の周波数応答解析について、無次元加振振動数 ω_0 ($=\omega a/V_s$) および無次元透水係数 K_0 ($=kV_s/ga$) の2つのパラメータを用いて変位・間隙水圧応答を調べる。なお、上記の無次元パラメータ中に見られる a はケーソン構造物の半幅、 k は地盤の透水係数、 g は重力加速度、 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、本研究では海底地盤の透水係数として $k=10^{-1}\sim 10^{-5} \text{ m/s}$ の範囲を考えているために、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。なお、 K_0 が小さくなることは、間隙水の粘性による減衰が大きくなることを意味する。また、ケーソン底面のコンパートメントの分割数 $NX = NY = 20$ とした。

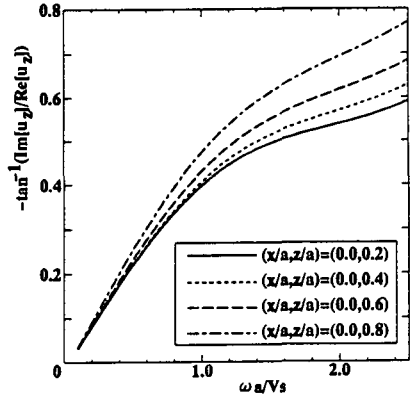
図-4は無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、スカート長 $D/a=1.0$ の場合におけるサクシヨンケーソン底面直下の4地点、すなわち (x,z) 平面上の $(x/a, z/a) = (0.0, 0.2), (0.0, 0.4), (0.0, 0.6), (0.0, 0.8)$ の地盤変位の周波数応答を絶対値と位相角を用いて図示したものである。なお、本研究では、スカート部分で囲まれたケーソン底面直下での地盤変位応答はサクシヨン力为主导的であると考えられるため、サクシヨン力を間隙水が負担するものとして変位応答を求めた。また、コンパートメント部分に作用するサクシヨンの比は $R_c=1.0$ とし、図中の $\text{Re}[\]$ および $\text{Im}[\]$ は変位の実部および虚部を取ることを意味する。

図-5は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、スカート長 $D/a=1.0$ の場合におけるサクシヨン力および摩擦力の影響が少ないと考えられるケーソン直下の5地点、すなわち (x,z) 平面上の $(x/a, z/a) = (0.0, 1.0), (0.0, 1.5), (0.0, 2.0), (0.0, 2.5), (0.0, 3.0)$ の地盤変位の周波数応答を絶対値と位相角を用いて図示したものである。これらの図より明らかなように、スカート部分で囲まれた範囲 ($0.0 \leq z/a \leq 1.0$) のケーソン底面近傍ではコンパートメントに作用するサクシヨン力の影響を顕著に受けるため、加振振動数が高くなるにつれて地盤変位が急激に大きくなり、ケーソン底面のサクシヨン力およびスカート部分からの影響を受けて、 $z/a=0.4$ 付近での地盤変位が大きくなっていることがわかる。また、ケーソン底面から離ればサクシヨン力およびスカート部分に作用する摩擦力の影響が小さくなるため、加振振動数が高くなるにつれて地盤変位は小さくなり、位相角の値も大きくなっていることがわかる。

一方、図-6は無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、スカート長 $D/a=1.0$ の場合におけるサクシヨンケーソン底面直下の4地点、すなわち (x,z) 平面上の $(x/a, z/a) = (0.0, 0.2), (0.0, 0.4), (0.0, 0.6), (0.0, 0.8)$ の間隙水圧の周波数応答を、また図-7はサクシヨン力および摩

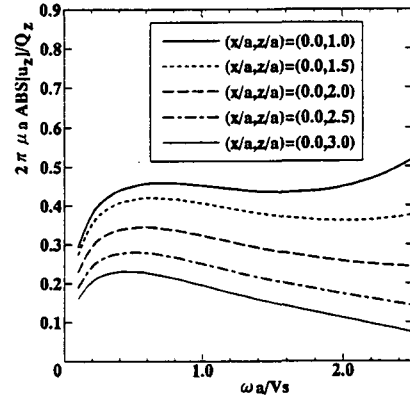


(a) 絶対値

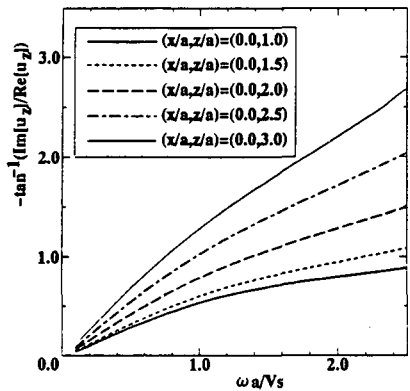


(b) 位相角

図-4 ケーソン周辺地盤の変位応答 ($K_0=0.1$, $D/a=1.0$, $R_c=1.0$)

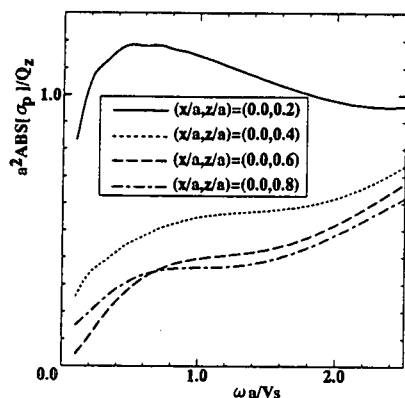


(a) 絶対値

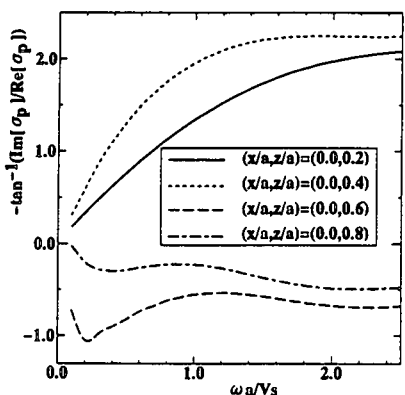


(b) 位相角

図-5 ケーソン周辺地盤の変位応答 ($K_0=0.1$, $D/a=1.0$, $R_c=1.0$)

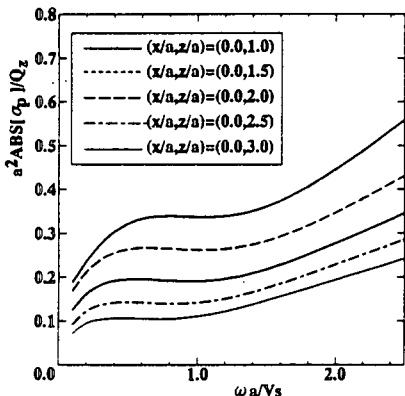


(a) 絶対値

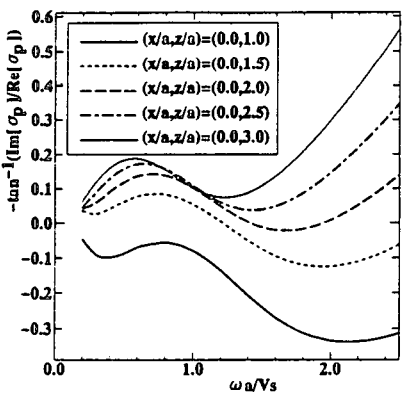


(b) 位相角

図-6 ケーソン周辺地盤の間隙水圧応答
($K_0=0.1$, $D/a=1.0$, $R_c=1.0$)



(a) 絶対値



(b) 位相角

図-7 ケーソン周辺地盤の間隙水圧応答
($K_0=0.1$, $D/a=1.0$, $R_c=1.0$)

擦力の影響が少ないと考えられるケーソン直下の5地点、すなわち (x, z) 平面上の $(x/a, z/a) = (0.0, 1.0)$, $(0.0, 1.5)$, $(0.0, 2.0)$, $(0.0, 2.5)$, $(0.0, 3.0)$ の間隙水圧の周波数応答を絶対値と位相角を用いて図示したものである。これらの図より、サクシンの影響が顕著であると考えられるケーソン底面に設けられたコンパートメントに近い $z/a=0.2$ の地点における間隙水圧は底面から離れた地点の応答に比べて大きな値となっている。ケーソン底面から離れるにつれて次第に応答が小さくなり、加振振動数が高くなるにつれて間隙水圧の応答も大きくなる傾向を示している。また、位相角についてはケーソン底面に近い地点と離れた地点においては位相のずれが顕著なものとなって現れている。とくに、地点 $z/a=0.4$ と 0.6 間付近における位相角に顕著な変動が現れていることがわかる。これは、ケーソン底部のスカート部分で囲まれた地盤内部においてコンパートメントに作用しているサクシン力による影響が間隙水圧応答に顕著に現れたものと考えられる。

次に、得られたサクシンケーソンの周波数領域における変位・間隙水圧応答特性に基づき、波圧実験より得られた波圧変動をケーソン前面に外力として作用させた場合のサクシンケーソン周辺地盤の変位・間隙水圧応答を求める。そこで、運輸省港湾技術研究所の実験水槽において測定したケーソン前面の波圧変動データについて述べる。

図-8は波圧測定に用いたケーソンの実験断面および計測器の配置を示したものである。ケーソンに作用する波圧変動については、ケーソン前面およびケーソン側面のそれぞれ7カ所および3カ所に取り付けられた波圧計を用いて測定された(前野ら、1995)。

図-9は、周期 3.04 s 、最大波高 $H_{\max}=33.3\text{ cm}$ 、有義波高 $H_{1/3}=18.0\text{ cm}$ の不規則波に対して得られたケーソン前面の7つの波圧計により測定された波圧変動およびケーソン底面中央点(y軸)に関するモーメント外力の変動を示したものである。なお、同図(c)は7カ所の波圧変動をケーソン底面のy軸回りのモーメントに換算して合成したモーメント外力の変動波形を示したものである。また、ケーソン前面の波圧はケーソン模型の縮尺(1/16)を考慮して実大ケーソンに換算した波圧変動となっている。この図の(a)および(b)よ

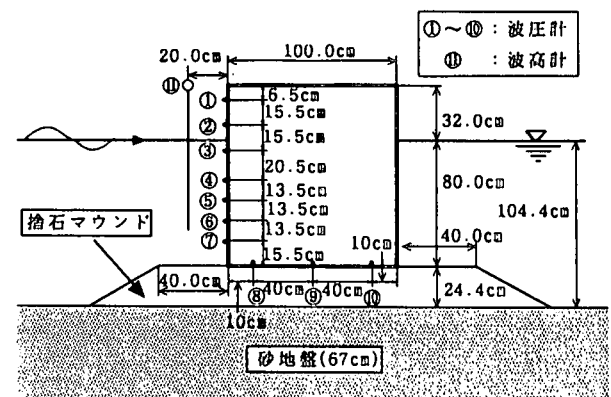


図-8 実験断面および計測機器の配置

り、ケーソン前面における測定点①～③の波圧変動は波の谷がフラットになりノコギリ状となっているが、測定点④～⑦については若干の変形は伴うがほぼ同じ程度の値を有する不規則波圧となってケーソン前面に作用していることがわかる。また、(c)に示すモーメント外力の変動波形は、ノコギリ状の波圧変動となっている測定点①～③に比べて測定点④～⑦の影響を大き

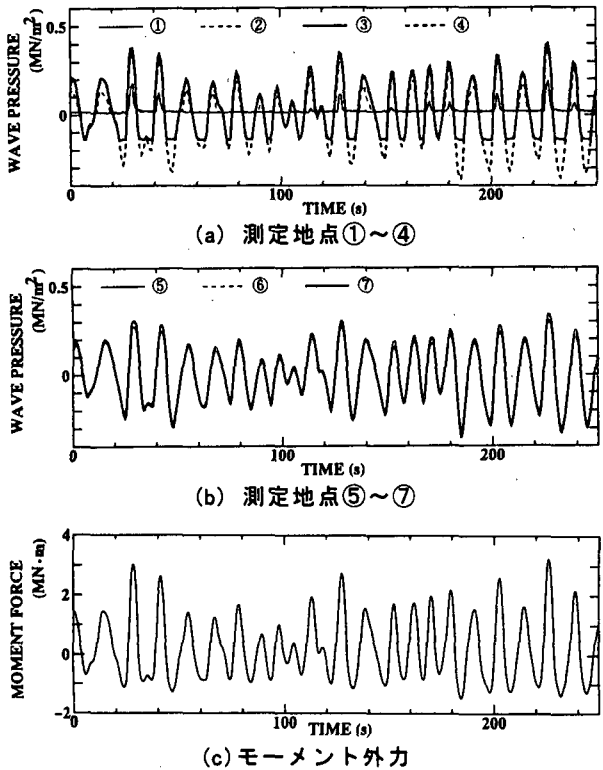


図-9 波圧変動(不規則波、周期 3.04s、最大波高 $H_{\max}=33.3\text{cm}$ 、有義波高 $H_{1/3}=18.0\text{cm}$)

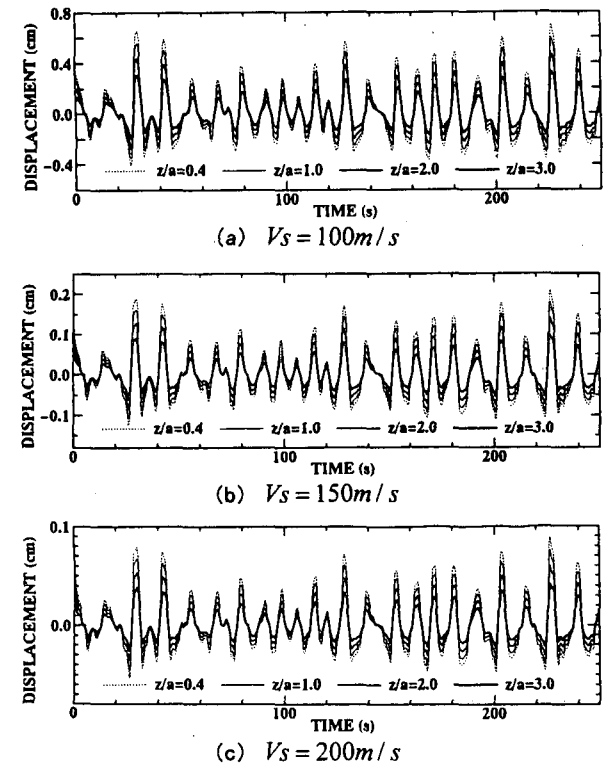


図-10 変位応答 ($K_0 = 0.1, D/a = 1.0, R_C = 1.0$)

く反映していることがわかる。
図-10は、図-4, 5に示されているケーソン底面中央直下の地盤変位の周波数応答を用いて、図-9(c)のモーメント外力に対する $z/a = 0.4, 1.0, 2.0, 3.0$ の4地点における地盤変位の時刻歴応答を示したものである。なお、地盤の横波の伝播速度は $V_s = 100\text{m/s}$ 、 150m/s および 200m/s の3つの場合とした。この図より、横波の伝播速度 V_s が大きくなるにつれて地盤の剛性が大きくなるため、各地点における地盤変位は小さくなっていることがわかる。また、図-4, 5に示されている地盤変位の周波数応答特性からも明らかなように、横波の伝播速度 V_s が小さくなるにつれてケーソン底面から離れた地点 ($z/a = 3.0$) からケーソン底面に近い地点 ($z/a = 0.4$) の順に位相のずれが生じていることがわかる。このため、地盤剛性および横波の伝

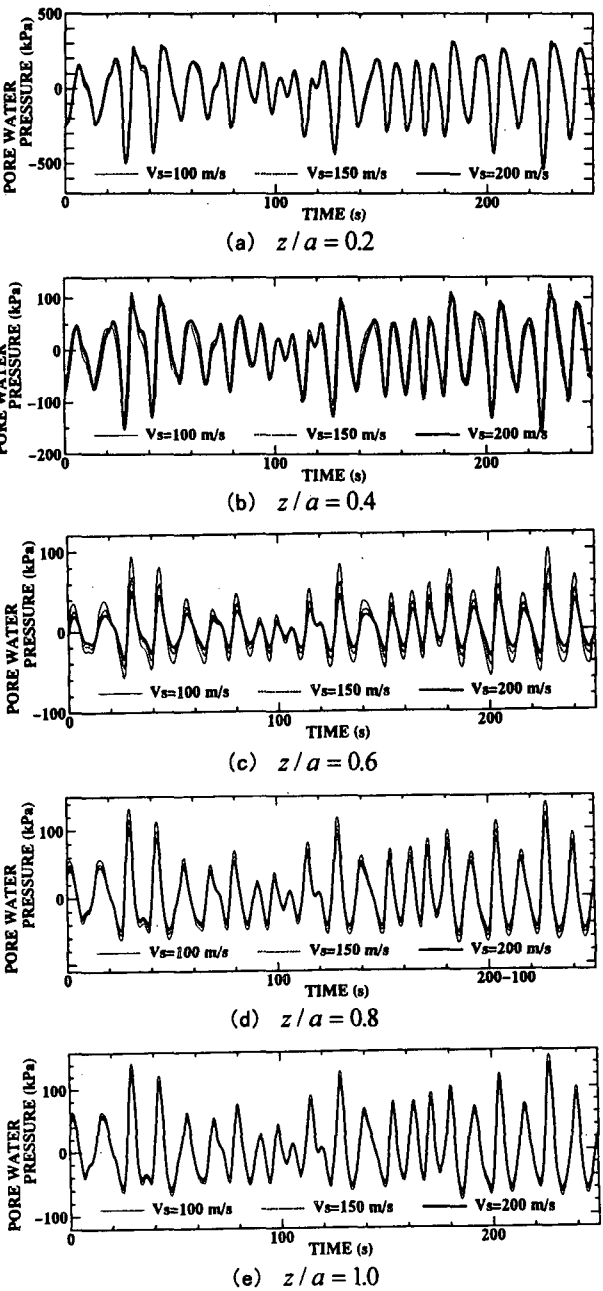


図-11 間隙水圧応答 ($K_0 = 0.1, D/a = 1.0, R_C = 1.0$)

播速度が小さい地点にケーソンを設置する場合は、ケーソン周辺地盤の変位が大きくなり、位相の遅れが生じることに配慮する必要がある。なお、紙面の都合上、ここには示していないが、周期 3.04 s、波高 33.3 cm の規則波によるモーメント外力の変動（前野ら、1995）に対する変位応答は図-9 (c) に示す不規則波によるモーメント外力に対する応答を包含するような形で、最大値となる変位応答を示している。

一方、図-11 は図-9 (c) のモーメント外力に対する $z/a = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の 5 地点における間隙水圧の時刻歴応答を、地盤の横波の伝播速度 V_s をパラメータにして図示したものである。なお、地盤の横波の伝播速度は $V_s = 100 \text{ m/s}$ 、 150 m/s および 200 m/s の 3 つの場合とした。図-6、7 に示す周波数応答特性からも明らかに、地点 $z/a = 0.2$ における間隙水圧の応答は非常に大きな値を示している。また、ケーソン底面から離れるにつれて、横波の伝播速度 V_s の違いによる間隙水圧応答への影響が徐々に小さくなっているが、とくに $z/a = 0.6$ と 0.8 の地点における間隙水圧応答には横波の伝播速度 V_s の違いによる顕著な差異が見られることがわかる。

図-12 は図-9 (c) のモーメント外力に対する $z/a = 1.0, 2.0, 3.0$ の 3 地点における間隙水圧の時刻歴応答を示したものである。この図より、横波の伝播速度 V_s が早くなるにつれて地盤の剛性が大きくなるため、各地点における間隙水圧応答は小さくなっていることがわかる。したがって、ケーソン底面における間隙水圧応答は、サクシオン力、スカート部分に作用する摩擦力、地盤の剛性に関与する横波の伝播速度や透水係数などの影響を非常に受けやすいことがわかる。

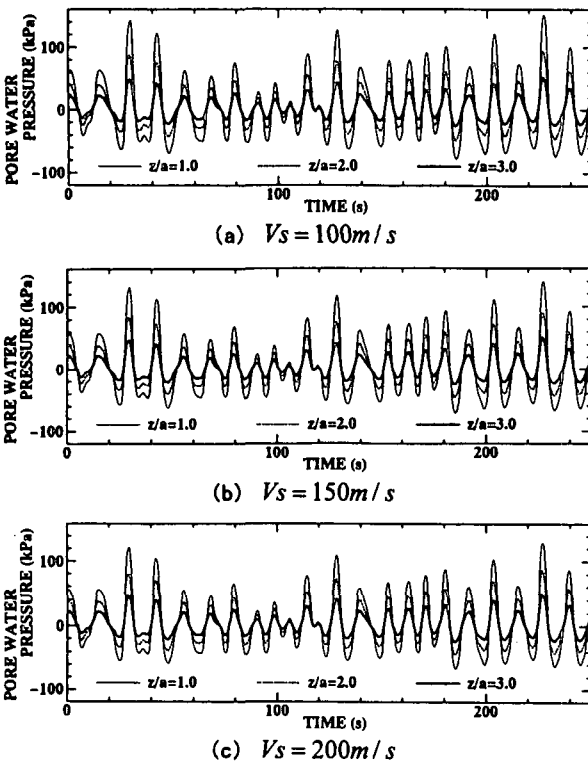


図-12 間隙水圧応答 ($K_0 = 0.1$, $D/a = 1.0$, $R_c = 1.0$)

4. おわりに

本研究は、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に設置されたサクシオンケーソン前面に規則的な波圧変動が作用した場合のケーソン周辺地盤の変位・応力および間隙水圧分布の周波数応答特性を求め、次いで、実験水槽において計測したケーソン前面の不規則波圧変動を用いて、サクシオンケーソン周辺地盤の実波浪を想定した不規則波に対する応答特性を検討した。その結果、以下のことがわかった。ケーソン底面およびスカート部分に囲まれた $z/a = 0.5$ 付近に最大となる変位を与える地点が存在する。また、地盤剛性および横波の伝播速度が小さい地点にケーソンを設置する場合は、ケーソン周辺地盤の変位が大きくなり、位相の遅れが生じる。一方、ケーソン底面下の地盤における間隙水圧応答は、ケーソン底部に近づくにつれてサクシオン力による影響を受けるため、横波の伝播速度の違いが顕著に応答値に影響する。また、不規則波圧変動に対するケーソン周辺地盤の変位・間隙水圧応答は、同じ周期と波高に対する規則波の応答に比較して小さくなり、規則波に対する応答値は最大値となる。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究補助金一般研究(c) (研究代表者：高谷富也、課題番号：07650584) 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

- 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・平石哲也・高山知司(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。
- 高谷富也・前野賀彦・平石哲也・高山知司(1994)：サクシオンアンカー周辺地盤の応答特性、海洋開発論文集、Vol. 10、pp. 207～212。
- 高谷富也・前野賀彦(1995)：サクシオン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。
- 続 誠・M. R. Horsnell・菊池喜昭・善 功企(1995)：海洋構造物の支持力特性 7. サクシオンを利用した基礎、土と基礎、土質工学会、Vol. 43、No. 3、pp. 49～54。
- 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。
- 前野賀彦・高谷富也・高橋重雄・下迫健一郎(1995)：サクシオンを考慮したケーソンの応答特性、海岸工学論文集、第42巻、pp. 811～815。
- 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 Traction, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 10, pp. 606-632。