

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

Dynamic Response of Caisson Structure with Suction Effect

高谷 富也*、前野 賀彦**

Tomiya Takatani and Yoshi-hiko Maeno

The dynamic response of caisson structure with suction force between bottom of caisson and seabed was numerically evaluated in the frequency domain by means of structure-seabed interaction analysis. 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 effects of skirt length of caisson structure and suction force type acting on compartments on the dynamic response of caisson structure were numerically investigated.

Key words: Caisson structure, Suction force, Skirt length, Frequency response

1. はじめに

沿岸域の開発に伴う埋立地造成に際して、軟弱地盤についてはSCP工法等による何らかの地盤改良工が施され、その後、ケーソン構造物による締め切り堤が設けられ内水面が埋め立て造成される。将来、沖側に展開される可能性のある造成地にあつては、締め切り堤は永久構造物である必要はなく、経済的有利性がある仮設構造物であつて撤去・移動の容易なものか、もしくは放置しても問題の生じないものが望まれる。廃棄される大型船舶の利用なども提案されているが、設置後の耐波安定性などの十分な検討が必要である。波浪条件の厳しい場所では、耐波安定性の観点から直置きケーソンの適用可能性は低いものとされている。そこで、マウンドの設置が考慮されるが、仮設構造物に対してマウンドを設置する場合にはその経済性が損なわれることになる。また、大水深下にケーソンを設置しようとする場合には、マウンド施工に多くの経費が掛かることから経済性が低下することが知られている。このようなことから、経済性の面で有利な直置きケーソンの適用を考え、問題点として指摘される耐波安定性を増すためにサクシンの効果を利用した鋼ケーソンについて検討を行うことにした。

すでに、前野ら(1993)および高谷ら(1994)は大気圧を把駐力として取り込むサクシンアンカーの軟弱地盤への適用性を検討している。それらの研究により、アンカー変位の周波数応答がアンカーの直径・スカート長およびサクシンの大きさに強く依存するなどの基本的特性を示している。さらに、アンカー周辺地盤の応答特性についても検討を行い、サクシンアンカーの施工性や把注力に関する優位性を示した。そこで、本研究ではサクシンアンカーにおいて認めら

れた把駐効果をケーソン構造物に取り入れた基本的モデルを示すと共にその周波数応答特性を求めた。

海底地盤に設置されたケーソン構造物の底面にサクシンを作用させた場合のケーソン構造物の変位応答特性を求めた。なお、海底地盤としては、Biot(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を想定した。サクシンをケーソン底面に作用させる場合に問題となるケーソン底面のコンパートメント形状および寸法等を考慮して、サクシンケーソン底面のスカート長やサクシンの大きさの違いがケーソン構造物の変位応答に及ぼす影響について周波数領域での検討を行い、サクシンの効果を取り入れたケーソン構造物の安定性に関する基礎資料を得るものである。

2. 解析手法

本研究では、サクシンの効果を受けるケーソン構造物が波や流れにより周期的なロッキング振動を受ける場合の動的変位解析を行い、ケーソン底部に設けられたスカート長およびサクシンの大きさやサクシンの分布等が構造物の変位応答にどのような影響を及ぼすかについて調べ、ケーソン構造物の耐波安定性に関する基礎資料を得る。

図-1は、海底地盤に設置されたサクシ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、ロッキング振動に対する動的変位応答解析を行う。

ところで、サクシンの効果を用いたケーソン基礎構造物の施工に関しては、構造物の鉛直性を維持し、施工中の安定性を確保するために、ケーソン構造物の底面には複数のコン

* 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番地)

** 正会員 日本大学短期大学部 建設学科

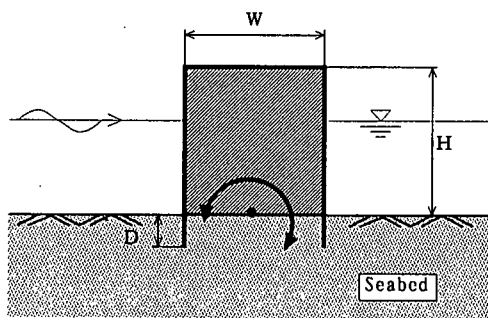


図-1 サクション効果を受けるケーソン構造物

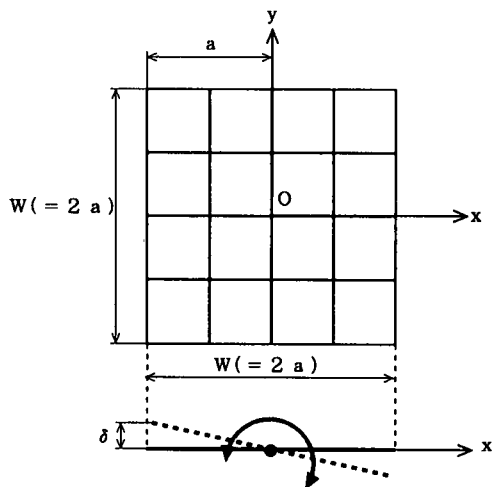


図-2 ケーソン底部のコンパートメント

パートメントが設けられている。これにより、各コンパートメント毎に異なるサクションを作用させてケーソン構造物の沈設施工上の問題点である鉛直性を確保している(続ら、1995)。このため、本研究では、図-2に示すようにケーソン構造物の底面を複数のコンパートメントに分割し、y軸回りのロッキング振動に対するサクション力の効果を検討する。

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力は、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で、また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、図-3に示すような多孔質飽和弾性地盤内部に作用

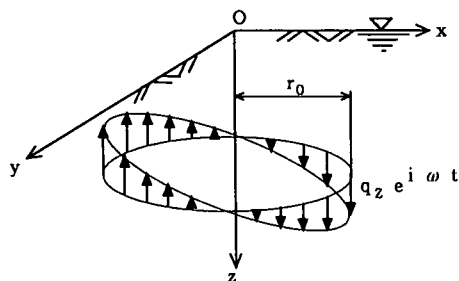


図-3 リング状ロッキング加振力

するロッキング加振力を用いて評価を行う。

いま、多孔質飽和弾性地盤内部の半径 r_0 の円形面上に作用する鉛直等分布加振力による鉛直変位解 u_z は、次式のよ

$$u_z = -\frac{Q_z}{2\pi\mu r_0} \int_0^\infty \frac{U(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \cdots (1)$$

ここに、 Q_z は等分布加振力の合力($=\pi r_0^2 q_z$)、 μ は多孔質飽和弾性地盤のせん断弾性係数、 $r=\sqrt{x^2+y^2}$ 、 κ は波数、 $J_0()$ 、 $J_1()$ は第0次および1次のベッセル関数である。また、上式の被積分関数に見られる β_3 、 Θ 、 $U(\kappa)$ 、 $F(\kappa)$ は波数 κ の関数であり、その詳細については、高谷・北村(1990)の論文に譲る。

一方、多孔質飽和弾性地盤内部の半径 r_0 の円周上に作用するy軸回りのリング状ロッキング加振力による鉛直変位解 u_z は、次式のように書き表される。

$$u_z = -\frac{Q_z}{4\pi\mu r} \int_0^\infty \frac{\kappa U(\kappa)}{\beta_3 \Theta F(\kappa)} J_1(\kappa r_0) J_0(\kappa r) d\kappa \cdots (2)$$

ここに、 Q_z はリング状ロッキング加振力の合力($=2\pi r_0 q_z$)である。

次に、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力を受けるケーソン構造物の変位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、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。すなわち、図-4に示すように、幅Wのケーソン構造物をN分割($N=4$)し、各コンパートメントの面積($=W^2/N^2$)と等価な面積をもつ円形面上に作用する鉛直等分布加振力をサクション力とし、またケーソンのスカート部分

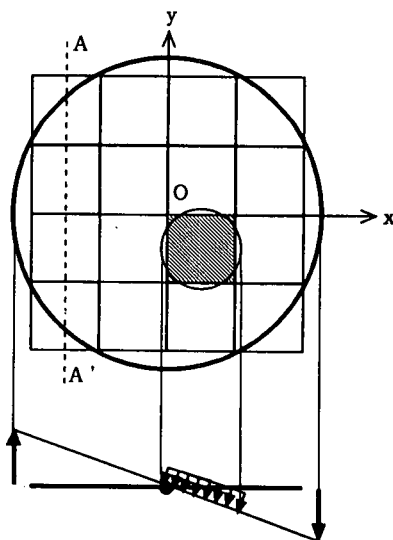


図-4 ケーソン底面の分割と分布加振力

周辺における摩擦抵抗力（地盤反力）として、ケーソン底面の周長と等価な長さを持つ円周上に作用するリング状ロッキング加振力を考える。

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構造物の端部変位が 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、サクシオン力を受けるケーソン構造物の変位応答を求めることができる。

3. ケーソン構造物の変位応答について

本研究では、サクシオン力を受けるケーソン構造物が設置される海底地盤の条件として、以下に示されている Halpern・Christiano(1986) が用いた飽和砂質土に対する諸弾性定数および密度等の数値を流用して、ケーソン構造物の周波数領域での変位応答解析を行う。

$$\begin{aligned} \mu &= 96 \text{ MPa}, \lambda = 432 \text{ MPa}, Q = 280 \text{ MPa}, \\ R &= 274 \text{ MPa}, \nu = 0.3 \text{ (ポアソン比)} \\ f &= 0.48 \text{ (多孔質飽和弾性地盤の間隙率)} \\ \rho_s &= 2.67 \text{ g/cm}^3 \text{ (弾性骨格の密度)} \\ \rho_f &= 1.00 \text{ g/cm}^3 \text{ (間隙水の密度)} \end{aligned}$$

ここに、 Q は弾性骨格と間隙水の体積変化の間に起こる相互作用に関する連成係数、 R は間隙水の圧縮剛性に関する係数である。また、上記の ρ_s 、 ρ_f は素材としての密度である。

本研究では、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 a_0 ($=\omega a/Vs$) および無次元透水係数 K_0 ($=kVs/ga$) の2つのパラメータを用いて変位応答を調べる。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、 Vs 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、ケーソン底部に設けられたコンパートメントに作用させるサクシオンのタイプとして、図-5に示す場合を想定している。同図中の斜線を引いた部分のサクシオンに対する斜線の無い部分のサクシオンの比として R_c なるパラメータを導入し、0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 の5つの場合についてケーソン構造物の変位解析を行った。なお、 R_c が大きくなることは、ケーソン構造物の端部に作用するサクシオンが

中央部分のそれに比べて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 $N=20$ とした。

図-6～8は、それぞれ無次元透水係数 $K_0 = 10.0, 0.1, 0.001$ の3つの場合について、スカート長 $D/a=0.0$ (スカート部分は地盤内部に埋設されているが、スカート部分と周辺地盤との摩擦抵抗力を無視した場合を意味する)におけるケーソン構造物の端部変位 δ (図-2参照)の周波数応答を、コンパートメント部分に作用するサクシオンの比 R_c をパラメータにして図示したものである。また、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。これらの図より明かなように、コンパートメント部分に作用するサクシオンの比 R_c が大きくなるにつれて、ロッキング振動によるケーソン構造物の端部変位は小さくなっていることがわかる。これは、ケーソンを剛体と仮定しているため、構造物と地盤との反力分布（接触圧分布）が構造物の中央から端部に行くにつれて増大する剛板分布に近い状態になるため、図-5に示すようにケーソン構造物の端部付近に位置するコンパートメントに作用するサクシオン力が大きくなるにつれて、ケーソン構造物の変位は小さくなるものと考えられる。また、いずれの無次元透水係数においても、コンパートメント部分に作用するサクシオンの比 R_c が1.00より大きくなれば、 $R_c = 0.50 \sim 1.00$ において見られた変位の減少ほどには期待できないことがわかる。一方、無次元透水係数 K_0 が小さくなるにつれて、同じサクシオン比 R_c に対するケーソン構造物の変位応答は小さくなっている。これは、 K_0 が小さくなるにつれて、間隙水の粘性による減衰が大きくなり、地盤骨格と間隙水の相対運動が小さくなることを意味しており、両者はほぼ同じ運動をするものと考えられる。

図-9は、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ およびコンパートメント部分に作用するサクシオンの比 $R_c = 1.00$ なる条件のもとで、スカート長 D/a をパラメータにしてケーソン構造物の端部変位の周波数応答を図示したものである。この図より、スカート長 D/a が長くなるにつれて、ケーソン構造物の変位も無次元加振振動数 $\omega a/Vs$ が低い範囲では小さくなっており、スカート長 D/a による顕著な差異が見られるが、無次元振動数 $\omega a/Vs$ が高くなれば、スカート長 D/a によるケーソン構造物の変位への影響は小さくなっ

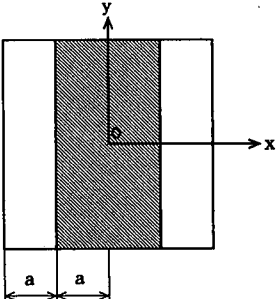


図-5 コンパートメントに作用させるサクシオンのタイプ

ていることがわかる。また、変位の虚部はスカート長 D/a に関係なく無次元加振振動数 $\omega a/Vs$ の全域において、ほぼ同じ値となっている。これは、ケーソン底部に設けられているスカート部分が長くなれば、スカート部分と周辺地盤の摩擦抵抗が増えるためであるが、加振振動数が高くなるにつれて、スカート部分と周辺地盤の摩擦抵抗力はケーソン底面に作用する地盤反力およびサクシオンに比べて、ロッキング振動を受けるケーソン構造物の変位応答にはあまり寄与しなくなるものと考えられる。

一方、図-10 は無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ 、コンパートメント部分に作用するサクシオンの比 $R_c = 1.00$ およびスカート長 $D/a = 0.25$ なる条件のもとで、ケーソン底面（図-

4に示す A-A'断面）に作用する地盤反力分布を無次元加振振動数 $\omega a/Vs = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ の5つの場合について図示したものである。この図より、無次元加振振動数 $\omega a/Vs$ が高くなるにつれて、地盤反力分布は実部が小さくなり、ケーソン中央部に比べて端部での地盤反力は顕著に小さくなっており、虚部で表されるケーソン底面から周辺地盤への逸散減衰が大きくなっていることがわかる。したがって、無次元加振振動数 $\omega a/Vs$ が高くなるにつれて、ケーソン底面のコンパートメントに作用するサクシオンの効果がケーソンの変位応答に大きな影響を与えることが考えられる。

図-11 は、無次元透水係数 $K_0 = 0.1$ 、コンパートメント部分に作用するサクシオンの比 $R_c = 1.00$ およびスカート長

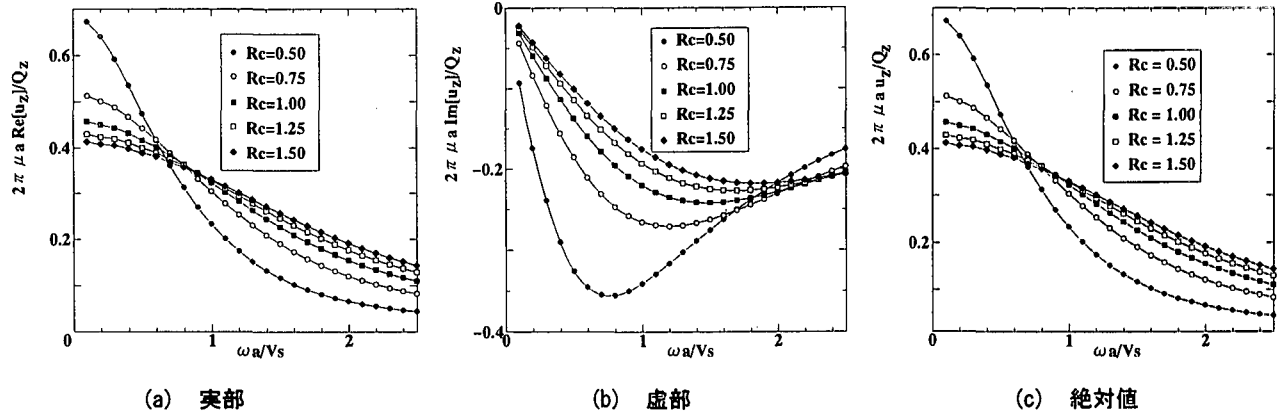


図-6 ロッキング振動を受けるケーソン構造物の端部変位の周波数応答 ($K_0 = 10.0, D/a = 0.0$)

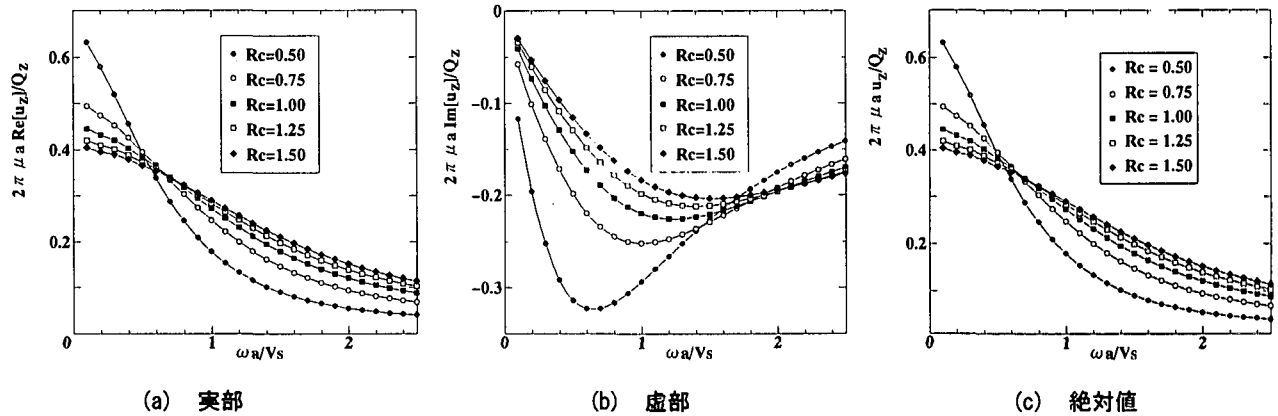


図-7 ケーソン構造物の端部変位の周波数応答 ($K_0 = 0.1, D/a = 0.0$)

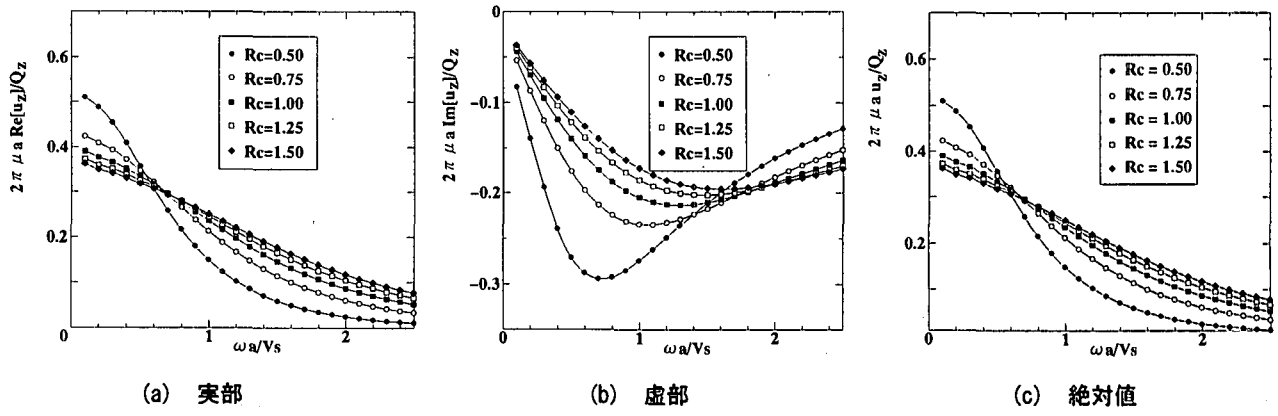


図-8 ケーソン構造物の端部変位の周波数応答 ($K_0 = 0.001, D/a = 0.0$)

$D/a = 0.25$ なる条件のもとで、ケーソン構造物の質量比 c をパラメータにしてケーソン構造物の端部変位の周波数応答を示したものである。なお、質量比 c およびケーソン構造物の変位振幅 A_z は次式で表される(高谷ら、1993)。

$$c = \frac{m_p}{\rho W^2 H} \quad \dots\dots (3 \cdot a)$$

$$A_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu a} \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{(1 - ca_0^2 f_1)^2 + (ca_0^2 f_2)^2}} \quad \dots\dots (3 \cdot b)$$

ここに、 ρ は多孔質飽和弾性地盤の密度、 m_p はケーソン構造物の質量である。なお、上式中に見られる f_1 および f_2 は次式で与えられるケーソン構造物の変位の実部および虚部

を意味する。

$$u_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu a} (f_1 + i f_2) \quad \dots\dots (4)$$

図-11 より、ケーソン構造物の質量比 c が大きくなるにつれて、ケーソン構造物の変位応答のピーク振動数が無次元加振振動数 $\omega a/Vs$ の低い方へ移動し、その応答ピーク値は大きくなり、ケーソン-地盤の振動系の減衰定数は小さくなっていることがわかる。この現象は、質量比 c が大きくなれば、ケーソン構造物から周辺地盤への逸散減衰効果が小さくなることを示している。このため、とくに質量比 c が大きいケーソン構造物の変位応答を評価する場合、ケーソン構造物

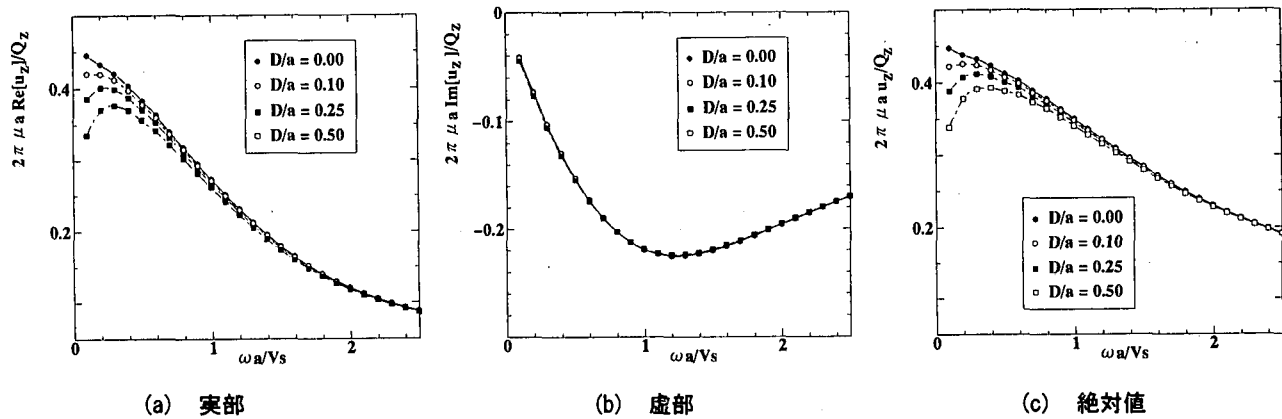


図-9 スカート長とケーソン構造物の変位応答の関係 ($K_0 = 0.1, R_c = 1.00$)

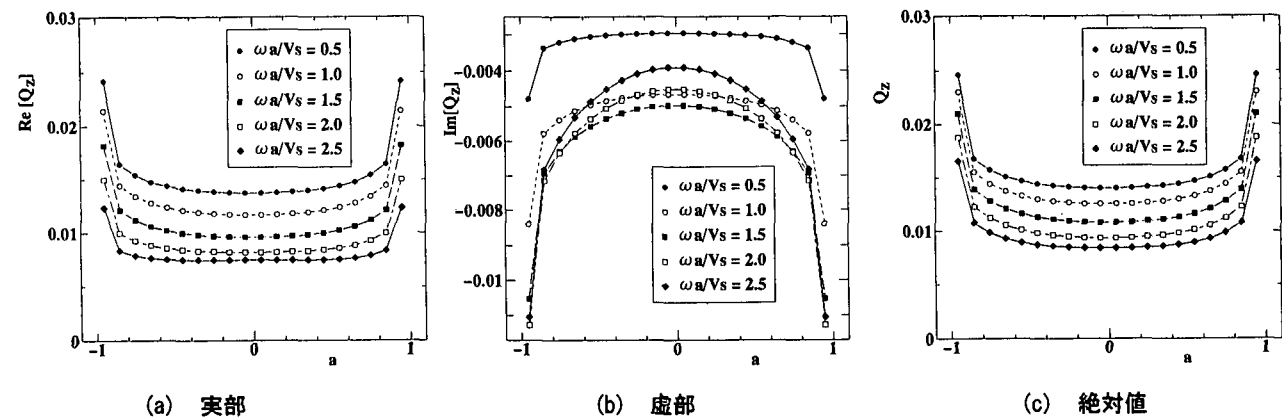


図-10 ケーソン構造物底面の地盤反力分布 ($K_0 = 0.1, R_c = 1.00, D/a = 0.25$)

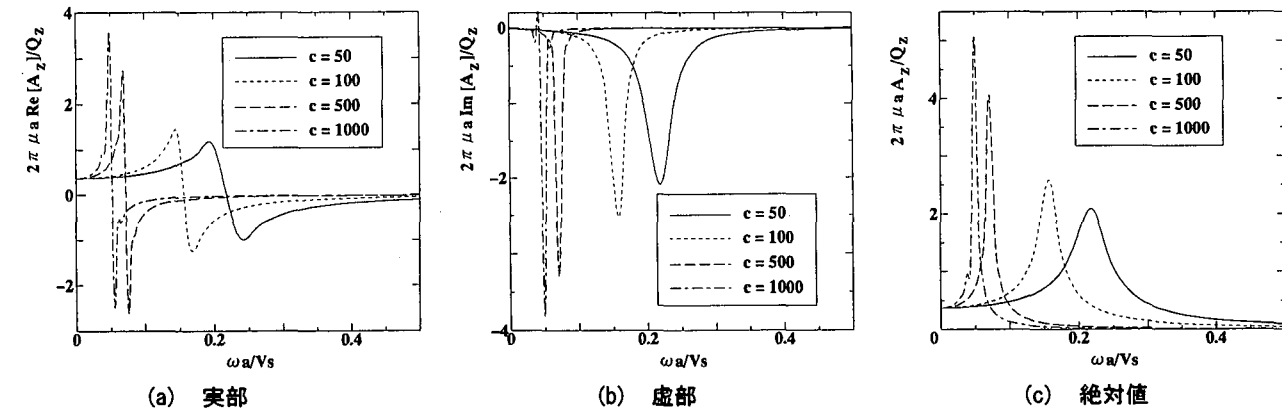


図-11 ケーソン構造物の質量比と端部変位の周波数応答 ($K_0 = 0.1, R_c = 1.00, D/a = 0.25$)

に直接作用する波や流れによる不規則な外力が有する振動数特性との関係により、ケーソン構造物の変位応答を大きく左右することがあり得ることに注意を払う必要があるものと考えられる。

4. おわりに

波や流れによる周期的なロッキング加振力がサクシオン効果を受けるケーソン構造物に作用した場合の動的変位応答解析を行うことにより、サクシオンを作用させるケーソン底面のスカート長やサクシオンの大きさの違いがケーソン構造物の変位応答に及ぼす影響について周波数領域での検討を行い、ケーソン構造物の耐波安定性に関する基礎資料を得た。本研究において得られた結論をまとめると以下のようになる。

- 1) サクシオンを受けるケーソン構造物の変位応答は、海底地盤の透水係数、およびケーソン底面に作用させるサクシオンの大きさやその配置の違いに大きく影響される。
- 2) ケーソン構造物底面のスカート側面の作用する周面摩擦抵抗の効果により、ケーソン底面のスカート長の違いがケーソンの変位応答に与える影響は加振振動数が低い範囲では顕著なものとなるが、振動数が高くなるにつれてその影響は小さくなる。
- 3) 加振振動数が高くなるにつれて、ケーソン底面に働く地盤反力分布は小さくなる。このため、加振振動数がたかい範囲では、ケーソン底面のコンパートメントに作用するサクシオンの効果がケーソンの変位応答に顕著な影響を与える。
- 4) 質量比 c が大きいケーソン構造物の変位応答を評価する場合、ケーソン構造物の変位応答を左右するケーソン構造物に作用する波や流れによる不規則な外力が有する振動数特性に注意を払う必要がある。

本研究では、サクシオン効果を受けるケーソン構造物が波や流れによる周期的な外力を受けるものとして、ケーソン構

造物の変位応答の解析を周波数領域において行った。サクシオン効果を用いたケーソン構造物の耐波安定性を検討するには、今後ケーソン構造物周辺地盤の応答特性も調べる必要がある。この研究課題については、稿を改めて報告する次第である。

最後に、本研究の遂行に際しては、文部省科学研究補助金(奨励研究(A)06750536)および特定研究「河川および海岸・海洋構造物の設計に関する基礎的研究」(研究代表者 高谷富也)の交付を受けたことを付記し、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(1993): 海底地盤特性を考慮した係留アンカーの応答特性に関する一考察、海洋開発論文集、Vol. 9、pp. 117~122.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.