

サクシオンを考慮したケーソンの応答特性

前野 賀彦*・高谷 富也**・高橋 重雄***・下迫健一郎****

1. 序 論

海洋構造物の大水深下の展開に際して、その基礎の重要性は論を待たないが、海象条件から考えて施工期間の短縮・施工の容易性が求められるところである。また、岩盤基礎が得られず軟弱な地盤である等の地盤条件に問題のある場所における施工も今後増えるものと考えられる。そこで、これらの要求に応えるべくサクシオンの利用が考慮され、実際に北海等で施工されている（続ら、1995）。それは、施工時に貫入力を得ることにより施工性を高めようとする海域や施工後に大気圧を遮断し引き抜き力に抵抗させようとする場合である。このサクシオンに関して、前野ら（1993, 1994）も、以前よりその施工性の良さ、繰り返し利用が可能であること、軟弱な海底地盤においてより有効性を発揮することなどから、浮体構造物の係留アンカーとしての適用性に関して検討を行ってきた。これらの一連の研究の中でシンカーや支圧型アンカー等の他の形式のアンカーにおいてもサクシオンの効果が認められることが明らかとなった。そこで、沿岸域の埋立造成に際して用いられる締め切り堤への直置き鋼ケーソンの適用を考えた。それは、サクシオンの効果を得るためにスカートに有する構造であり、軟弱な地盤での施工性に優れ、広範な水深下への適用が可能と考えられるものである。

本研究では、スカートに有する鋼ケーソンの耐波安定性を検討するために、サクシオンを受ける鋼ケーソンの周波数応答解析を行い、地盤の透水係数、スカート長およびコンパートメントに作用させるサクシオンの分布の違いがケーソン変位に及ぼす影響について調べた。次いで、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測定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。

2. ケーソンの周波数応答

本研究では、海底地盤として Biot (1956) により考えら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し、この多孔質飽和地盤上にサクシオンを考慮して設置された鋼ケーソンに波圧外力が作用した場合の応答特性より耐波安定性を検討するものである。ここでは、地盤の透水係数、ケーソン底面のスカート長およびケーソン底面のコンパートメントに作用させるサクシオンの大きさの違い等がケーソンの変位応答に及ぼす影響について調べる。

図-1 は海底地盤に設置されたサクシオ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。ケーソンとしては、幅および奥行き W 、高さ H の寸法を有する直方体を想定し、ケーソン底部には D なるスカート長を有する構造となっている。なお、本研究では直置き鋼ケーソンを剛体と見なして、ケーソンのロッキング振動に対する変位応答解析を行う。

サクシオンを受けるケーソンは、ケーソン底面に設けられた複数のコンパートメント毎に異なるサクシオンを作用させて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、本研究では図-2 に示すようにケーソン底面を複数の正方形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オン力の効果を検討する。

ケーソンの変位応答解析を行う場合、前野ら（1993）のサクシオ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オン力

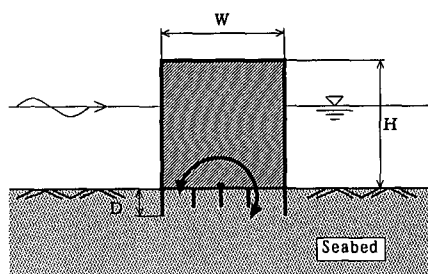


図-1 サクシオンを受けるケーソンの概略

* 正会員 農博 日本大学短期大学部教授 建設学科
 ** 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 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室室長
 **** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 耐波研究室

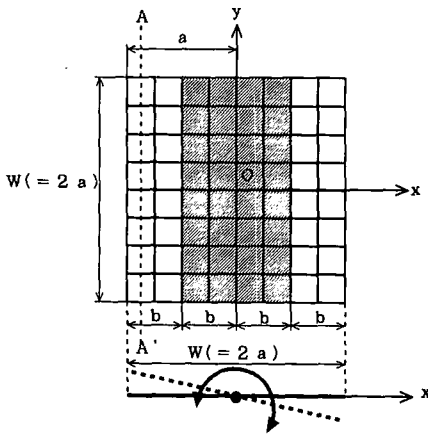


図-2 ケーソン底部のコンパートメント

は、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、多孔質飽和弾性地盤内部の円周上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(高谷ら, 1995)。

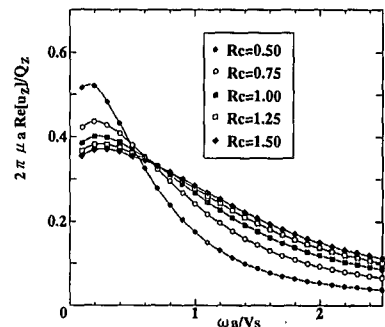
地盤条件としては飽和砂質土に対する諸弾性定数および密度等の数値(Halpern・Christiano, 1986)を用いて、ロッキング振動を受けるケーソンの変位解析を行った。なお、周波数応答においては、無次元加振振動数 $\omega a/V_s$ および無次元透水係数 $K_0 (=kV_s/ga)$ の2つのパラメータを用いて変位応答を調べた。また、上記の無次元パラメータ中に見られる a はケーソン構造物の半幅、 k は地盤の透水係数、 g は重力加速度、 ω は円振動数、 V_s は素材における横波の伝播速度である。また、本研究では海底地盤の透水係数として $k=10^{-1} \sim 10^{-5}$ m/s の範囲を考えているために、無次元透水係数は $K_0=10 \sim 10^{-3}$ なる範囲の値を仮定した。

また、本研究では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ジ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ジョンに対する斜線の無い部分のサクシジョンの比として 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つの場合を想定した。なお、 R_c が大きくなることは、ケーソン底面の端部に作用するサクシジョ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。

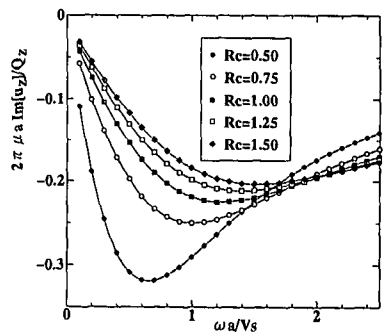
図-3は、無次元透水係数 $K_0=0.1$ 、スカート長 $D/a=0.25$ におけるケーソンの端部変位の周波数応答を示したものである。図中の $\text{Re}[\]$ および $\text{Im}[\]$ はそれぞれ変位の実部および虚部を取ることを意味する。この図より明かなように、コンパートメント部分に作用するサクシジョンの比 R_c が大きくなるにつれて、ケーソン端部

の変位応答は小さくなっている。これは、ケーソンを剛体と仮定しているため、構造物と地盤との間に働く反力分布がケーソン底面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、ケーソン底面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ジョン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。

図-4は、無次元透水係数 $K_0=0.001$ およびコンパートメント部分に作用するサクシジョンの比 $R_c=1.00$ 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、ケーソンの変位は無次元加振振動数 $\omega a/V_s$ 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 $\omega a/V_s$ が高くなれば、スカート長 D/a によるケーソンの変位応答への影響は小さくなっ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 $\omega a/V_s$ 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力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ジョン



(a) 実部



(b) 虚部

図-3 ケーソン端部の変位応答 ($K_0=0.1$, $D/a=0.25$)

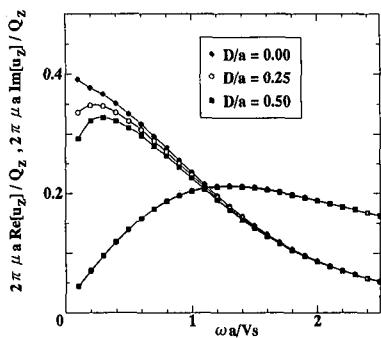


図-4 スカート長と変位の関係 ($K_0=0.001$)

に比べて、ロッキング振動を受けるケーソン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-5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-2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 $\omega a/V_s=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 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 $\omega a/V_s$ が高くなるにつれて、地盤反力分布は小さくなっており、またケーソン中央部に比べて端部での地盤反力は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 $\omega a/V_s$ 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。

3. ケーソンの変位応答について

本節では、前節で得られたサクシオンを受けるケーソンの周波数領域における変位応答特性に基づき、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ケーソンの応答を求め、スカート長、地盤の透水係数および鋼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分布の違い等がケーソン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、概略を以下に述べる。

図-6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。実験に用いたケーソンは厚さ15mmの亚克力合成樹脂板で作成した箱を厚さ5cmのモルタル板の上に固定した。また、ケーソン内部は鉛の重りを入れて重量調整を行った。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。また、ケーソン前面20cm

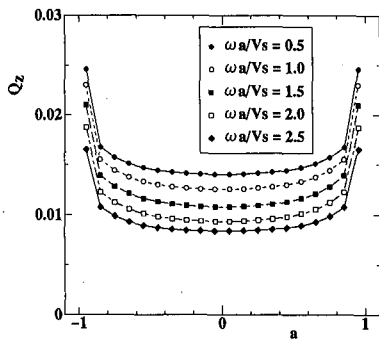


図-5 ケーソン底面の地盤反力分布 ($K_0=0.1$, $D/a=0.25$, $R_c=1.00$)

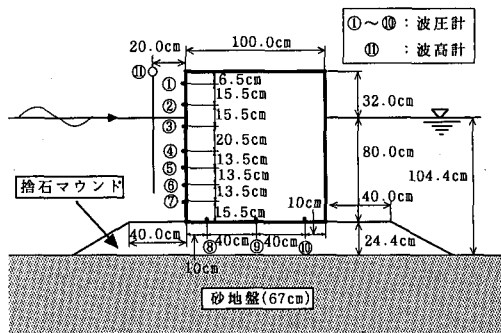
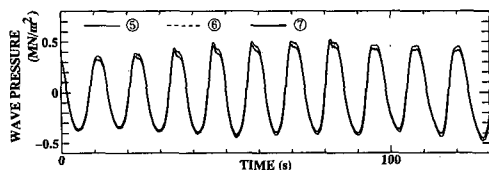


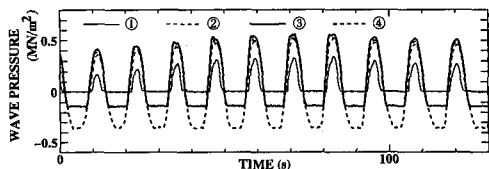
図-6 実験断面および計測機器の配置

のところには波高計が設置されている。

図-7は、ケーソンに作用させる波浪条件として周期3.04s、波高33.3cmの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を示したものである。なお、ケーソン前面の波圧変動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。なお、本研究におけるケーソ



(a) 測定地点①～④



(b) 測定地点⑤～⑦

図-7 波圧変動(規則波、周期3.04s、波高33.3cm)

ンの大きさは $W=16\text{ m}$, $H=17.9\text{ m}$ である。この図より、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規則波となってケーソン前面に作用していることがわかる。

図-8は図-7に示されている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外力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。個々の波圧変動をモーメント外力に換算することにより、ノコギリ状の波圧が波圧計①～③により測定されたが、合成されたモーメント外力は波圧計④～⑦による影響を反映していることがわかる。

図-9は、無次元透水係数 $K_0=0.001$ 、サクシオン比 $R_c=1.0$ およびスカート長 $D/a=0.50$ の場合について、次式で示す質量比 c のケーソン変位応答 A_z に及ぼす影響について調べたものである。

$$c = \frac{m}{\rho W^2 H} \dots\dots\dots (1)$$

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

ここに、 ρ および μ はそれぞれ多孔質飽和弾性地盤の密度およびせん断剛性、 m はケーソンの質量、 $a_0 = \omega a / V_s$ 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。

$$u_z = \frac{Q_z}{2\pi\mu a} (f_1 + if_2) \dots\dots\dots (3)$$

図-9より明らかなように、ケーソンの質量比 c が大きくなるにつれて、ケーソンの変位応答のピーク振動数が無次元加振振動数 $\omega a / V_s$ 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 が大きいケーソンの変位応答を評価する場合、ケーソンに直接作用する波による外力が有する振動数特性との関係により、ケーソン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。

図-10は、無次元透水係数 $K_0=0.001$ 、サクシオン比 $R_c=1.00$ およびスカート長 $D/a=0.50$ なる条件において、質量比 $c=100, 500$ および 1000 の3つの場合に対するケーソンの変位応答を示したものである。なお、地盤の横波の伝播速度は $V_s=200\text{ m/s}$ としている。図-9に示す質量比 c の違いがケーソンの変位応答に及ぼす影響からも明かなように、質量比 $c=100$ における変位応答は、他の質量比における応答に比べて小さくなっている。また、質量比 c の違いによりそれぞれの変位応答には振動数特性の違いが現れていることがわかる。これは図-8に示すモーメント外力が有する振動数特性と図-9に示す周波数応答の影響が変位応答に顕著に現れたものと考えられる。

図-11は、無次元透水係数 $K_0=0.001$ 、サクシオン比 $R_c=1.00$ および質量比 $c=500$ の場合において、スカート長 D/a の違いがケーソンの変位応答に及ぼす影響について調べたものである。図-4に示されている周波数

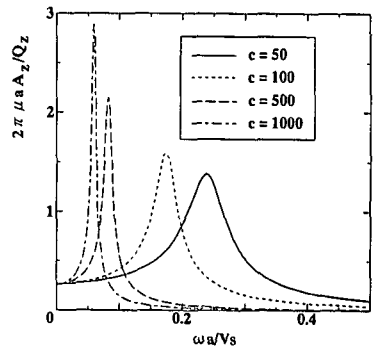


図-9 質量比と端部変位の周波数応答 ($K_0=0.001$, $D/a=0.50$)

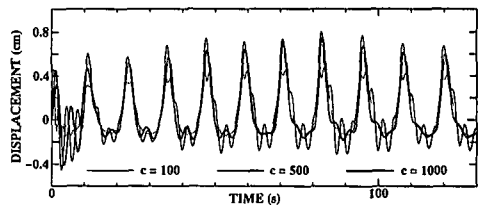


図-10 変位応答と質量比の関係 ($D/a=0.5$)

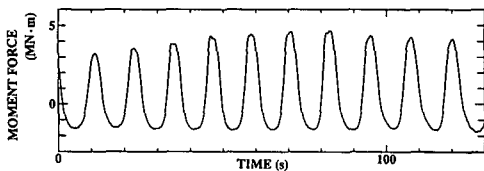


図-8 モーメント外力

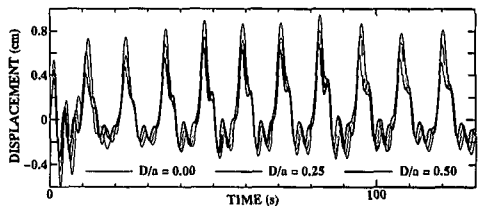


図-11 変位応答とスカート長の関係 ($K_0=0.001$, $c=500$)

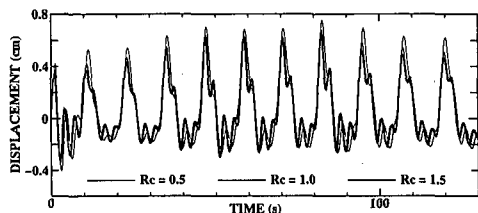


図-12 変位応答とサクシオン比の関係 ($c=500$, $D/a=0.5$)

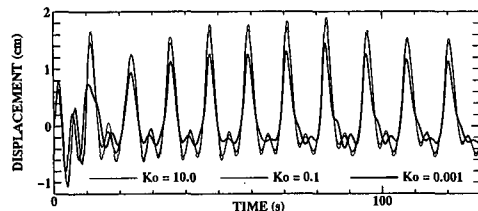


図-13 変位応答と透水係数の関係 ($c=500$, $D/a=0.0$)

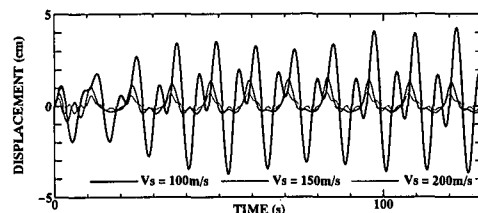


図-14 変位応答と地盤剛性の関係 ($c=500$, $D/a=0.25$)

応答からも明らかなように、スカート長 D/a が長くなればスカート部分に作用する周辺地盤との摩擦抵抗力が増大するため、ケーソンの変位応答は小さくなっていることがわかる。

一方、図-12 は無次元透水係数 $K_0=0.001$ 、スカート長 $D/a=0.50$ および質量比 $c=500$ の場合において、サクシオン比 R_c の違いがケーソンの変位応答に及ぼす影響について調べたものである。図-3 に示されている周波数応答からも明らかなように、サクシオン比 R_c が大きくなれば、ケーソン底面の端部付近におけるコンパートメントに作用するサクシオンが大きくなるため、変位応答は小さくなっている。このため、ケーソン底面の端部のコンパートメントに大きなサクシオンを作用させることがケーソンの耐波安定性を増すことになる。

図-13 はスカート長 $D/a=0.0$ 、サクシオン比 $R_c=1.00$ および質量比 $c=500$ の場合における地盤の透水係数の違いによる変位応答を示したものである。この図より、無次元透水係数 K_0 が小さくなればケーソンの変位応答が小さくなっている。これは、 K_0 が小さくなれば間

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ためと考えられる。

図-14 は無次元透水係数 $K_0=0.001$ 、スカート長 $D/a=0.25$ 、サクシオン比 $R_c=1.00$ および質量比 $c=500$ の場合における地盤の透水係数の違いによる変位応答を示したものである。この図より、地盤の剛性に深く関係する横波の伝播速度 V_s が大きくなるにつれてケーソンの変位応答は小さくなっている。このため、ケーソン設置現場の地盤の剛性はケーソンの耐波安定性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

4. 結 論

実験より得られたケーソンの波圧変動外力をサクシオンを受けるケーソン前面に外力として作用させた場合のケーソンの変位応答解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。サクシオンを受ける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。また、ケーソン底部を複数のコンパートメントに分割することは、ケーソン底面中央のコンパートメントよりも端部のコンパートメントに大きなサクシオンを作用させた場合のケーソンの変位応答が小さくなるため、耐波安定性に関して有効である。さらに、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つれて、ケーソンの変位応答は小さくなり、耐波安定性が増す。一般に、軟弱地盤では剛性が小さくなるが、一方透水係数も小さくなることから、この種の地盤では有効な構造と考えられる。

参 考 文 献

- 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.
- 統 誠・M. R. Horsnall・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. 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.