

着底式海洋構造物の地震時の滑動抵抗に関する実験

鹿島建設(株)技術研究所 正会員 今井 貫爾
 鹿島建設(株)土木設計本部 同 上 山本 治生
 同 上 同 上 草野 直幹
 鹿島建設(株)技術研究所 同 上 池谷 毅
 同 上 同 上 永富 政司

1. 序 論

着底式構造物は、構造物と地盤との間の摩擦力により、水平外力に対して力の釣合を保つ。着底式海洋構造物は、陸上の構造物に比べると、浮力が作用するため接地圧が減少し、摩擦力が小さくなり、滑動しやすくなる傾向がある。現行の多くの設計基準（例えば土木学会(1977)）では、構造物と地盤との間の滑動は許容されていない。そのため、着底式海洋構造物、特に浮体として曳航され現地において沈設される大型の構造物を設計する場合には、摩擦力をいかに効率的に大きくするかが重要な問題となる。

これに対して、近年、異常時の巨大な外力に対しては、構造物全体の破壊につながらない範囲で多少の滑動を許す構造物（軟着底構造物）が種々提案されている（例えば Yamamoto et al.(1986)）。この軟着底構造物は、経済的であること、免震効果を期待できることなど様々な長所を有するものの、具体化にあたっては、滑動中の挙動や滑動抵抗等解明すべき点が多い。

本報では、これらの観点から、地盤上の構造物の滑動現象に着目して、力学特性の解明の第一歩として基本的な実験を行ったものである。

2. 実験目的

滑動現象に関する研究としては、地震による地盤と構造物との間の滑動解析（Yamamoto et al.(1986)）、鋼材と砂との間の摩擦特性（Uesugi and Kishida(1986)）、模型振動実験（上部・檜垣(1984)）などがある。しかし、構造物の底面形状、滑動速度・加速度の違いによる滑動現象の差異については、必ずしも十分に解明されているとは言えない状況である。

そこで、本研究では、外力として地震を、構造物としてコンクリートを、地盤として砂地盤を想定して、地盤と構造物との間の以下の力学的特性を調べることを目的とした。

- ① 滑動開始時の滑動抵抗力と滑動中の滑動抵抗力との差異
- ② 構造物の底面形状、滑動速度の違いが滑動抵抗力、滑動挙動に与える影響
- ③ 砂地盤の振動により発生する動的な滑動現象の発生条件

3. 実験方法

上述の目的に応じて、3項目の実験を行った。それぞれの実験方法を以下に述べる。

(1) 静摩擦実験

静摩擦実験では、滑動開始時の滑動抵抗力を構造物の重量、載荷高さ、砂の含水比を変化させて調べた。この実験では、図-1に示すように砂層上にコンクリート試験体を設置し、試験体に横方向の定常力を作用させる。荷重を1Kgf単位に増加させ、滑動を開始する荷重（滑動開始時滑動抵抗力）を求めた。

(a) 砂地盤

砂地盤は水中落下法により作製し、長さ2m、幅2m、深さ0.5mである。実験に使用した砂の物理特性を表-1に示す。

(b) 試験体

静摩擦実験に用いた試験体は、30cm×30cm×6cmのコンクリート製直方体である。コンクリート試験体の上部にウェイトを取り付け、試験体の重量を調節している。

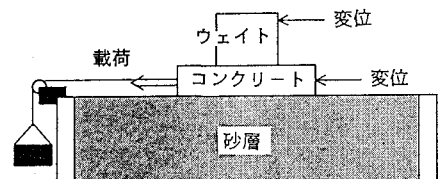


図-1 静摩擦実験の概要

表-1 大型砂層の物理特性

中央粒径: 0.4 mm	相対密度: Pr=70.5 %
均等係数: 2.7	内部摩擦角: $\phi=42$ 度
乾燥密度: 1.41	粘着力: $c=0.02$

(c) 実験ケース

静摩擦実験のケースを表-2に示す。なお、表中で、不飽和状態の含水比は16.2%である。

(d) 計測

静摩擦実験では滑動抵抗力及び水平方向の変位を計測した。滑動抵抗力は滑動が発生したときの載荷荷重とした。水平方向の変位の計測には変位計を用いた。

(2) 等速度滑動実験

等速度滑動実験では、試験体が一定速度で滑動している際の滑動抵抗力、滑動挙動を、滑動速度、底面形状を変化させた条件で調べた。この実験では、図-2に示すように、分力計を取り付けたコンクリート試験体を砂層上に設置し、曳航台車により分力計を牽引し、試験体を一定速度で滑動させる。この際の抵抗力、水平変位、鉛直変位、回転変位を測定した。

(a) 砂地盤

砂層は静摩擦実験と同一のものを用いている。

(b) 試験体

等速度滑動実験に使用したコンクリート試験体の底面形状、及び設置状況を図-3に示す。これらの試験体のうち、スカート付き試験体のスカート部分は鋼製である。

(c) 実験ケース

等速度滑動実験では、載荷高さを約12cm、試験体重量を約24Kgfで一定としている。滑動速度は、平底面試験体については、2~25cm/secで変化させ、他は約12cm/secで一定とした。

(d) 計測

等速度滑動実験では、滑動抵抗力、水平、鉛直、回転変位を測定した。滑動抵抗力の計測には分力計を、鉛直変位の計測にはダイヤルゲージを用いた。回転変位については、これを2ヶ所の鉛直変位から算定した。

(3) 振動滑動実験

静摩擦実験と一定速度滑動実験では、試験体に水平力や強制変位を与えて、滑動を発生させ、砂層と試験体との間の滑動の力学特性を調べた。振動滑動実験では、地震と同様に砂層を振動させた場合の滑動発生条件、滑動挙動を、振動周波数、加速度を変化させた条件で調べた。

図-4に示すように、振動装置に砂層を取り付け、砂層上に試験体を設置する。砂層全体を水平方向に振動させ、滑動条件を調べた。

(a) 砂地盤

砂層は水中落下法により作製した。長さ50cm、幅25cm、深さ12cmのものである。使用した砂は中央粒径0.18mmの豊浦標準砂とした。作製した砂層の物性は、含水比23%、乾燥密度1.55、内部摩擦角37度である。

(b) 試験体

図-5に振動滑動実験に用いた円筒鋼製試験体を示す。コンクリート面と荒さを類似させるため、試験体底面に規格CW1000CCの耐水サンドペーパーを貼り付けた状態で実験を行った。また、滑動に伴う試験体の回転をなるべく防ぐため底面周囲には45度の面取りをした。

(c) 実験ケース

砂層表面の加振方向加速度、試験体の上部、中央部、下部の加振方向の

表-2 静摩擦実験ケース一覧

重量	載荷高さ	飽和砂	不飽和砂
65.9kg	15.8cm	A-1	—
	12.0cm	A-2	—
	0.5cm	A-3	—
24.2kg	12.0cm	A-4	B-1
	0.5cm	A-5	B-2
18.3kg	0.5cm	A-6	—

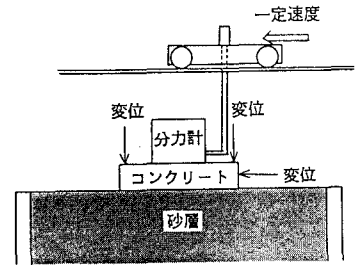
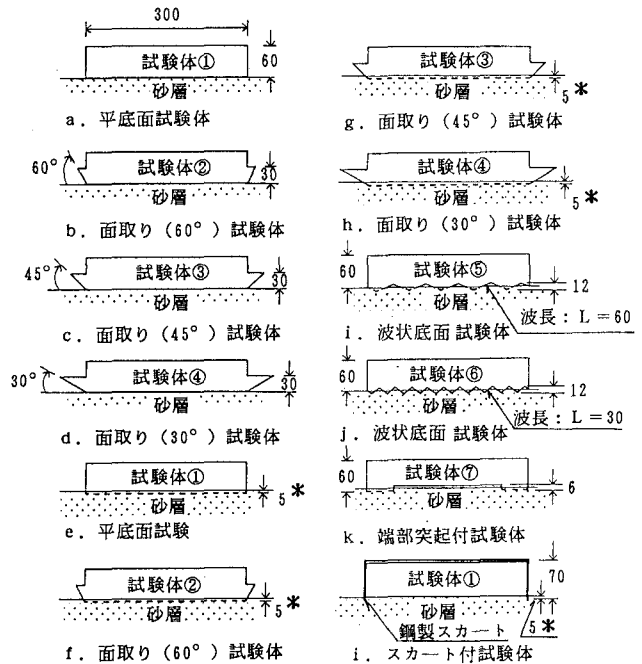


図-2 等速度滑動実験概要



*は根入れ深さを示す
(単位: mm)

図-3 等速度滑動実験試験体設置状況

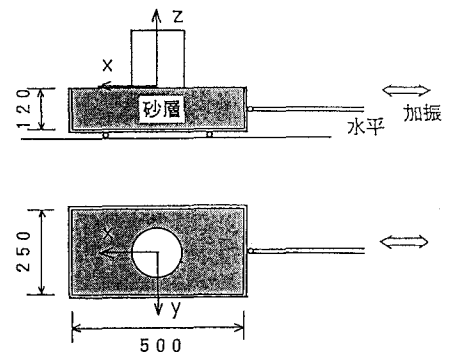


図-4 振動滑動実験概要

水平加速度を計測している。加速度の計測には、超小型抵抗式加速度計を用いた。

4. 実験結果及び考察

(1) 静摩擦実験

(a) 滑動抵抗力

静摩擦実験によって得られた滑動抵抗係数 μ （滑動抵抗力／接地力）を図-6に示す。図中の横軸は、地盤に作用する応力の偏差値を平均値で除した値である。ただし、地盤反力は、台形分布をすと仮定してこれを求めた。縦軸は、滑動抵抗係数である。これをみると、滑動開始時の滑動抵抗係数は、今回の実験の範囲では、接地圧、飽和度の違い、載荷高さによらず一定であることがわかる。これは、砂とコンクリートとの間の摩擦であっても、クーロンの摩擦則がほぼ成り立つ領域が存在することを示すものである。また、滑動抵抗係数の値は今回の実験データからはほぼ $\tan(2\phi/3)$ となり、設計基準（例えば土木学会(1977)）で用いられている値とほぼ等しい。

(2) 一定速度滑動実験

(a) 時系列特性

図-7に一定速度滑動実験の代表的なケース（平底面試験体、滑動速度12.5cm/sec）で取得された滑動抵抗力、水平変位、鉛直変位、回転変位の時系列を示す。

変位についてみると、水平変位と同時に、鉛直、回転変位が生じており、試験体進行方向に潜り込みながら滑動していることがわかる。この沈下と回転の存在は、大きさの違いはあれ、砂層上の滑動現象に共通にみられる挙動である。次に、滑動抵抗力についてみると、試験体が滑動を開始する際に、载荷治具が試験体に接触する際の衝撃による小さなピークが存在するが、滑動中はほぼ一定の値となる。滑動変位が大きくなると、抵抗力は変動し、絶対値も増加するようになる。これは滑動変位が大きくなると、試験体の回転が大きくなり、砂地盤と試験体底面との間の摩擦の他に、試験体前面の砂の潜り込みによる抵抗が生じるためと思われる。実験結果の代表例として、試験体④が潜り込んだ時の状況を写真-1に示す。

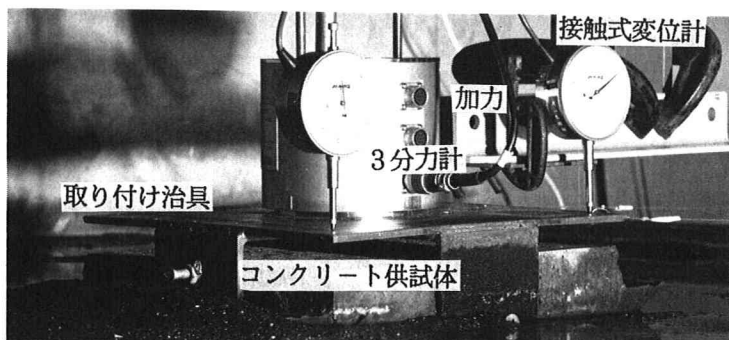


写真-1 試験体前面部の砂層への潜りこみ状況

(b) 滑動挙動

滑動挙動をさらに詳しく調べるために、図-8に0.1秒おきの平底面試験体の位置を描いた。

また図-9及び図-10に、試験体が10cm滑動した時点での、単位滑動距離当りの沈下量（沈下速度／滑動速

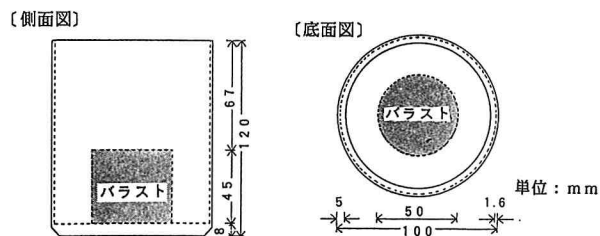


図-5 振動滑動実験試験体

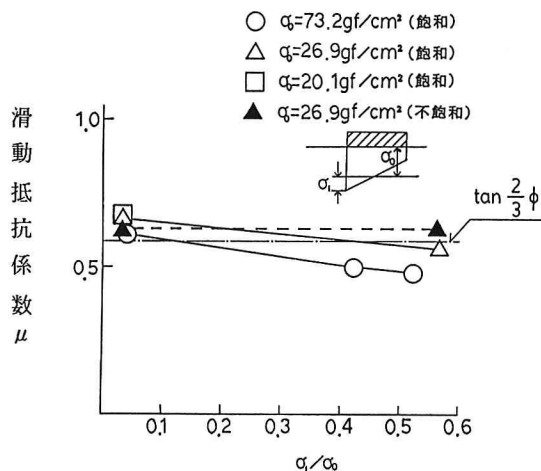


図-6 滑動開始時滑動抵抗係数

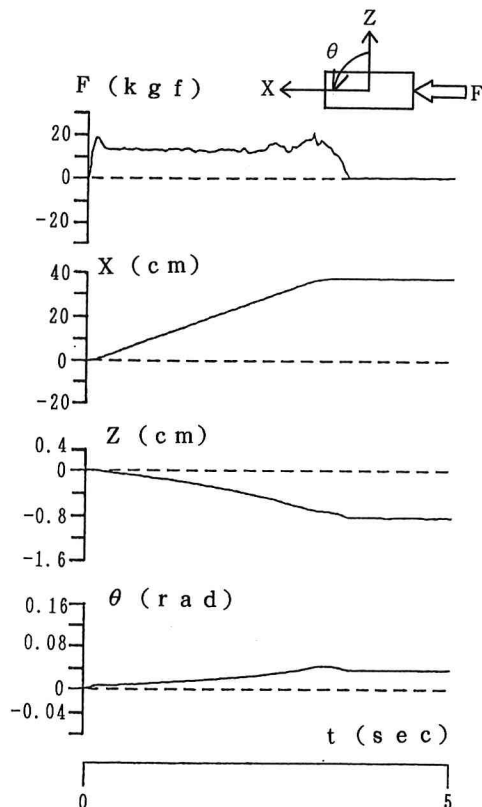


図-7 一定速度滑動実験時系列データ

度)および回転量(回転速度/移動速度)をそれぞれ滑動速度に対してプロットした。

まず、滑動速度の変化が滑動挙動に与える影響について考える。図-8をみると、砂地盤上を滑動する試験体は速度の違いによらずほぼ一定の経路を運動することがわかる。これは砂とコンクリート間の滑動現象が滑り速度にあまり依存しないことを意味するものである。

次に、底面形状が挙動に与える影響を考える。図-9、10をみると、底面形状が異なることにより、滑動挙動が大きく変化することがわかる。例えば、端部突起付試験体やスカート付試験体のように両端部に根入れを持つ試験体は沈下や回転が大きく、底部を面取りした試験体、底面を波状にした試験体は沈下や回転が小さいことがわかる。

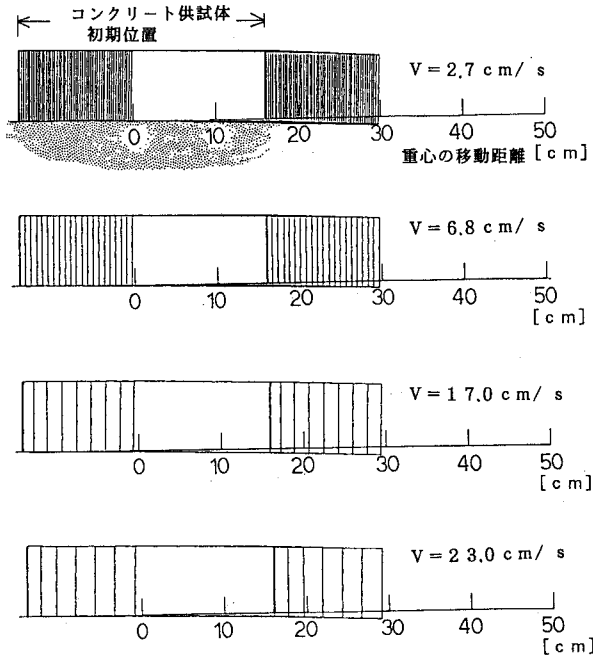


図-8 平底面試験体の滑動挙動

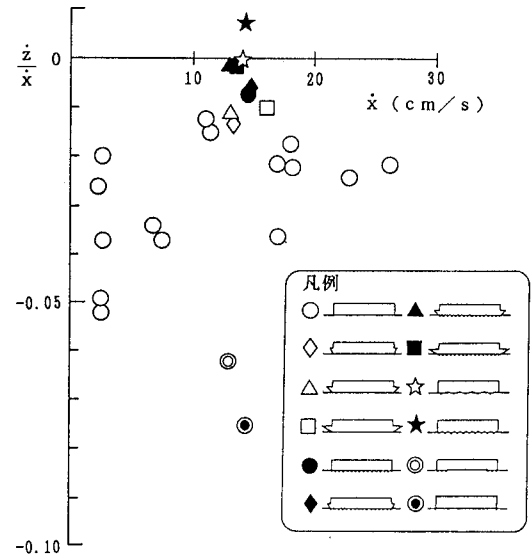


図-9 等速度滑動時の沈下量

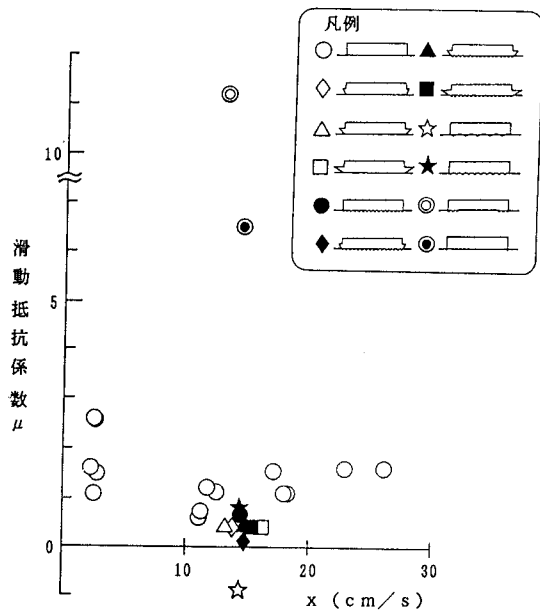


図-10 等速度滑動時の回転量

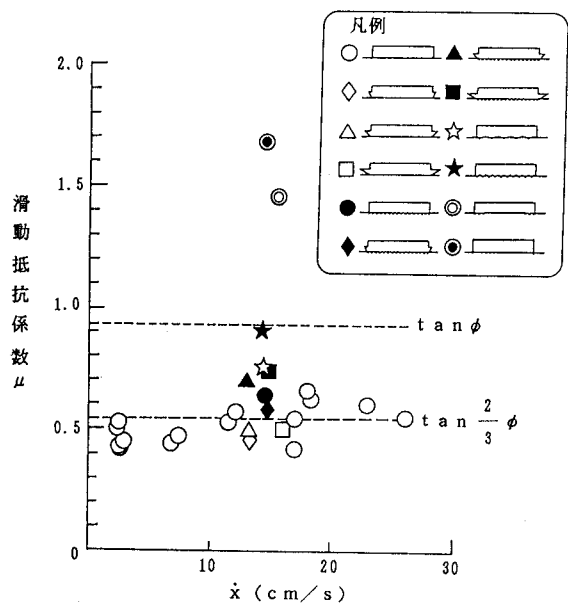


図-11 等速度滑動時滑動抵抗係数

(c) 滑動抵抗力

滑動抵抗力は、回転が大きいケースを除いて、滑動距離が小さい範囲では、ほぼ一定値となる。試験体が約10 cm移動した時点での滑動抵抗係数を速度に対してプロットしたものを図-11に示す。

同図中の、平底面試験体の滑動抵抗係数についてみると、滑動挙動と同様に速度にはほとんど依存せず、ほぼ一定値となることがわかる。抵抗係数の値は、平底面の場合、今回の実験結果からは、滑動開始時の抵抗係数と等しい $\tan(2\phi/3)$ 程度となる。

また、滑動抵抗力に及ぼす面取りの影響は顕著ではないが、底面形状の影響は比較的大きいことがわかる。波状底面試験体は $\tan\phi$ 程度まで滑動抵抗係数を増加させる。これは、平底面試験体の場合、コンクリート面と砂面の境界近傍が滑動面になるのに対して、波状底面試験体の場合は波頂部を結んだ砂層内部が滑動面となるため、砂と砂とのせん断強度が滑動抵抗力となってあらわれたものと考えられる。

(3) 振動滑動実験

(a) 時系列特性

振動滑動実験の代表的なケース(振動周波数4 Hz, 最大加速度670 Gal)で計測された地盤表面と構造物の底部で観測された加速度波形を図-12に示す。滑動が生じていなければ二つの加速度波形はほぼ等しい。一旦滑動を生じた場合には、図-12に示すように、構造物の応答加速度の波形は、矩形に近い波形となる。これは、滑動が発生したため、試験体の応答加速度が小さくおさえられたことを意味する。また、加速度の向きが反転する前に加速度が増加する傾向が見られるが、これは模型底面が砂地盤に潜り込む際の抵抗によるものと考えられる。

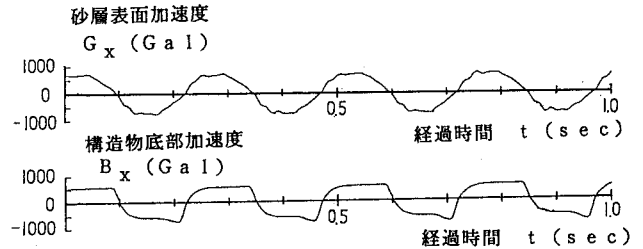


図-12 砂層表面および試験体底部の加速度波形

(b) 滑動条件

振動実験において、どの程度の加速度により滑動が発生するかを調べるため、地盤表面の片振幅を横軸に、構造物底面の加速度の片振幅を縦軸にプロットしたものが図-13である。

これを見ると、地盤加速度が $(\tan(2\phi/3) \sim \tan\phi) \times$ 重力加速度程度の値となると滑動が発生することがわかる。よって、地盤が振動して構造物との間に滑動が生じる動的な滑動現象の場合においては、静摩擦実験、一定速度滑動実験により計測された滑動抵抗係数 $(\tan(2\phi/3))$ よりやや大きめの抵抗係数となった。滑動現象に与える動的影響については、今後詳細な検討が必要と考えられる。

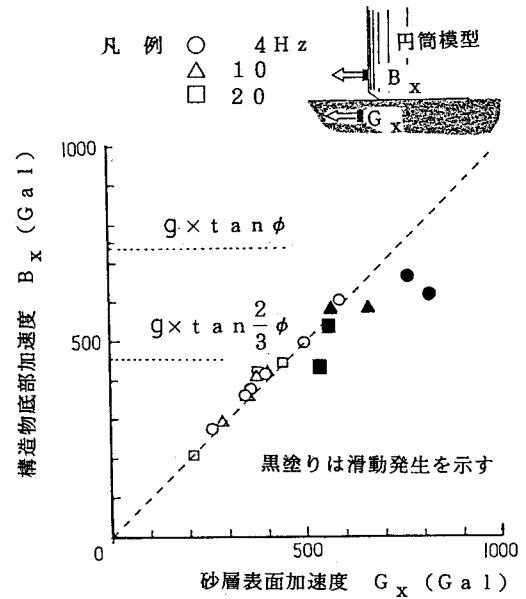


図-13 砂層表面加速度片振幅と試験体底部加速度片振幅との関係

6. 結論

本研究では、砂地盤と構造物との間の滑動抵抗力、滑動挙動についての基礎的な実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- ① 砂地盤と構造物との間の滑動抵抗係数は、滑動開始時と一定速度滑動中とではほとんど変化がない。
- ② 平底面試験体の滑動抵抗係数は滑動速度によりほとんど一定かやや大きくなる傾向にある。
- ③ 構造物が砂地盤上を滑動する場合、沈下や回転を伴う。
- ④ 構造物の底面形状の違いは、滑動抵抗力、滑動挙動に大きな影響を与える。

また、振動滑動実験によって得られた滑動抵抗力は、静摩擦実験、一定速度滑動実験によって得られた滑動抵抗力より多少大きめであった。滑動現象に与える振動時の動的な影響については、今後とも実地盤に近い条件での実験を行い、滑動抵抗データの蓄積が望まれる。

<謝辞>

本研究は、社団法人日本造船研究協会第205研究部会『海洋コンクリート構造物の設計・建造技術に関する実証的研究』の一部として実施したものであります。終始ご指導を頂き、また研究成果の公表をお許し頂いた藤田譲東京理科大学教授、松岡一祥運輸省船舶研究所主任研究官をはじめ関係各位に心から謝意を表します。

<参考文献>

上部達夫・檜垣典弘(1984)：水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究，港研報告，第23巻第3号，pp. 153～186.

土木学会編(1977)：海洋コンクリート構造物設計施工指針(案)。

Uesugi, M. and H. Kishida (1986) : Influential factors of friction between steel and dry sands. Soils and Foundations, Vol. 26, No. 2, pp. 33-46.

Yamamoto, H., T. Kimura, S. Hiroshima, T. Ohta, K. Horikoshi and N. Fujimoto (1986) : New aseismic design method of offshore gravity structure in highly seismic regions, Proc. of the 5th OMAE Symposium, Vol. 1, pp. 693-700.