

海底の泥岩上における軟着底式剛体基礎の地震時滑動に関する基礎的検討

金谷 守*・西 好一**・青山瑞明***・
大波正行****

海底の泥岩地盤上に軟着底方式の基礎構造物が建設される場合、地震時滑動が重要となる。本研究では、模型振動実験を通じて滑動に伴う応答の変化、滑動に影響を及ぼす因子の検討を行った。また、泥岩とコンクリートの接触面に対する繰り返し直接せん断試験から摩擦特性を明らかにし、トライボロジーの概念を適用してその定式化を図ると共に、模型振動実験のシミュレーションを実施して適用性を検討した。

Key Words : nearshore, mud stone, earthquake, sliding, friction

1. はじめに

近年、ウォーターフロント計画や発電所の海上立地構想など、海洋空間の有効利用に対する社会的関心が高まっている。海洋構造物の設計において陸上構造物と大きく異なる点のひとつは、浮力による有効自重の低下を十分考慮して安定性評価を行わなければならないことであり、地震力や波力に対する滑動評価が重要な検討項目となる。現在の設計法では、地震力や波力を静的な一方荷重に置き換えている上、基本的に滑動を許容しない設計思想に基づいているため、一般に海洋構造物は陸上に比べ大規模にならざるを得なかった。一方、構造物が許容できる範囲内で滑動を許すことが可能であれば、規模の縮小に伴う経済性の向上はもとより、地震の横揺れに対する免震効果も期待できることになる。

地震時における構造物の滑動に着目した実験的研究としては、重力式係船岸の地震時滑動量の推定を目的とした上部らの研究¹⁾、軟着底基礎の地震時滑動と応答に着目した志波・藤井ら^{2),3)}の研究に見られる模型振動実験や、上杉ら^{4),5)}による砂と鋼材間の摩擦特性に関する単純せん断試験、白阪ら⁶⁾による砂・泥岩とコンクリート間の摩擦特性に関する直接せん断試験といった要素実験的研究が挙げられる。一方、解析的研究としては、クーロン摩擦の仮定のもとに簡易な運動方程式から滑動量を評価する藤野らの研究⁷⁾、ジョイント要素を用いて地盤と構造物の滑動・剝離を考慮した二次元有限要素解析を行った土岐ら^{8),9)}の研究が挙げられよう。また、Zaman et al¹⁰⁾、Carter et al¹¹⁾は接触面の非線形挙動に関する構成式を提案し、地盤—構造物の相互作用問題への適用性

を検討している。

本研究では、海底の泥岩地盤上にコンクリート製の剛体基礎が軟着底方式によって建設された場合の地震時滑動に関する基本的な検討を行う目的で、模型振動実験ならびに接触面の直接せん断試験を実施し、これらの実験結果から定式化された接触面の摩擦特性に基づいて模型振動実験の数値シミュレーションを行った結果について述べている。

2. 振動台を用いた滑動に関する模型実験

泥岩上に沈設された剛体基礎の振動時における滑動について、その基本的特性を把握する目的で小型模型振動実験を実施した。主な着目点は滑動による応答の変化、滑動に及ぼす諸因子の影響、接触面の摩擦特性の推定にある。

(1) 実験装置・実験方法と計測項目

a) 実験装置と実験方法

実験装置の全体図を図-1に示す。振動台の寸法は3 m×3 mで、電気油圧サーボ方式によって水平方向に加振される。最大積載重量は10トン、加振振動数はDC~30 Hz、最大変位量は±150 mmの仕様となっている。この振動台上に、幅3.0 m、高さ0.5 m、奥行き0.5 mの鋼製の水槽を剛結し、水槽内中央に幅0.4 m、高さ0.15 m、奥行き0.4 mの泥岩ブロックをブロック固定用の鉄製治具を用いてしっかりと水槽に固定する。泥岩は石川県能登で採取された珪藻質の泥岩で、その代表的な物理・力学特性は表-1に示す通りである。泥岩ブロックの表面には入力加速度を測定するために加速度計が埋め込まれている。また、泥岩の表面は水平度を確保すると同時に、模型構造物との接触面にローカルな凹凸が生ずるのを可能な限り避けるため、高精度なストレートエッジなどを用いて入念に表面の平滑化を図った。粗さ計によって測定された泥岩表面粗さの一例を図-2に

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所耐震部土質グループ (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所研究開発部計画課長

*** 工修 茨城県庁(元東海大学大学院生)

**** 工修 (株)構造計画研究所解析技術部耐震解析室長

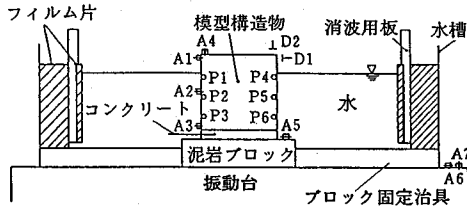


図-1 模型振動実験の概要と計測器の配置

表-1 泥岩の物理・力学特性

		泥岩 (珪藻質)
間 隙 比 e		2.72
乾 燥 密 度 γ_d	g / cm ³	0.60
湿 潤 密 度 γ_s	g / cm ³	1.32
含 水 比 w	%	120.0
比 重 G_s		2.27
一 軸 圧 縮 強 度 q_u	kgf / cm ²	20
せん断弾性波速度 V_s	m / sec	400

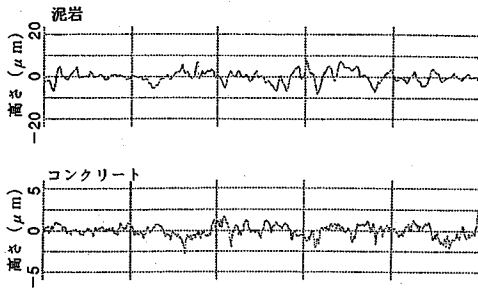


図-2 泥岩、コンクリート表面の粗さ測定結果の一例

示す。模型構造物は、厚さ 2 cm のアクリル板を用いた一辺 0.3 m の中空立方体型で、内部には自重を調整するための鉛板が固定できるようになっている。また、模型の底部 5 cm はコンクリートできており、その底面は泥岩と一様に接触するよう研磨加工が施されている。底面の粗さ計による測定結果の一例を図-2 に示している。この模型構造物を泥岩上に静置した後、所定の水位まで水を入れて、振動台を加振する。なお、実験では各加振が終了する毎に模型構造物を一旦取り出し、泥岩表面を布で清掃しながら再び設置することにした。泥岩ブロックは、すべてのケースを通じて共通のものを使用している。泥岩ブロックの傾斜実験では所定の傾斜になるように加工されたアングルを水槽の底面に取り付け、その上に泥岩ブロックを載せた後、固定治具でしっかり固定する方法を採った。

さて、今回の実験に用いた水槽のように側面が剛板である場合には、水槽が振動することによって反射波が発生する。また、低振動数の加振時には水面にスロッシングが生ずる可能性がある。本実験ではこれらの影響を極力低減させるため、振動台の外に固定点を持つ梁に鉄板を取り付け、図-1 に示すように水槽の両側面付近に挿

入する処置をとった。少なくとも目視による限り、水面の動揺が小さく押さえられることは確認している。加えて消波効果を高めるため、両消波板表面ならびに水槽の側面と消波板の隙間に細かく切ったフィルムを配置した。

b) 計測項目

計測項目は加速度、動水圧、変位の 3 項目である。加速度計は定格容量 2 G のひずみゲージ式変換器で、模型構造物の水平・鉛直加速度 (A1~A4)、泥岩ブロックの水平加速度 (A5) 振動台の水平・鉛直加速度 (A6~A7) を測定する。水圧計は定格容量 0.5 kgf/cm² のひずみゲージ式変換器で、模型構造物の両側面に 3 点ずつ (P1~P6) 取付けられている。模型構造物の変位を測定するための変位計は、測定値が加振振動数の影響を受けない配慮から定格容量 ± 25 mm の非接触型変位計 (D1, D2) を用いており、それぞれ水槽に固定点を設けた。したがって測定される変位は、泥岩ブロックに対する模型構造物の相対変位ということになる。各計測器の具体的な配置は図-1 に示す通りである。

(2) 実験条件

実験は (a) 加振振動数、(b) 入力加速度レベル、(c) 接地圧、(d) 水深 (水面から泥岩の表面まで)、(e) 基礎地盤の傾斜といった滑動に影響を及ぼす可能性があると考えられる 5 つの条件をパラメトリックに変化させて実施された。ただし、入力加速度波形はすべて正弦波とし、波数は 20 波を基本とした。各パラメータの値は次に示す通りである。

- (a) 加振振動数 : $f=5, 10, 20$ (Hz)
- (b) 入力加速度 : $\alpha_i=100\sim 700$ (gal)
- (c) 接地圧 : $P_0=4, 17, 27$ (gf/cm²)
- (d) 水深 : $h=1, 12, 23$ (cm)
- (e) 基礎地盤の傾斜 : $I=0, 1/50$

なお、事前に実施された共振実験 (入力加速度 5 gal) によると、いずれのケースも共振点は 30 Hz 以上に存在しており、今回の実験はすべて共振振動数より低い振動数帯で実験が行われたことになる。

(3) 実験結果および考察

a) 滑動による模型構造物の応答に関する検討

模型構造物が滑動する場合と滑動しない場合の測定結果の顕著な例として図-3 に水平加速度、動水圧、水平変位 (滑動変位) の時刻歴を示した。模型構造物が滑動しない場合には模型構造物の水平加速度、動水圧のいずれも振動中その振幅が変化していない。一方、模型構造物が滑動する場合には、水平加速度および動水圧は滑動とともに次第に低下し、ある値に収束していく傾向を示している。動水圧の挙動に着目すると、互いに対称な位置に取り付けられた P3 と P6 は、滑動の有無にかかわらず振幅は相等しいものの位相は完全に逆転している。

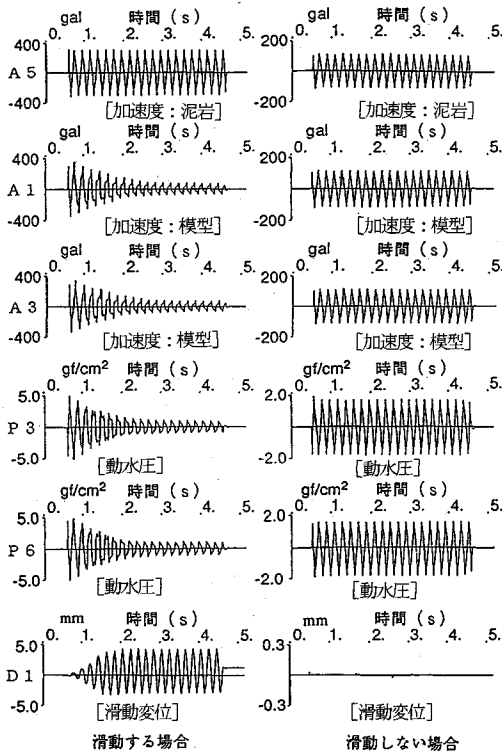


図-3 水平加速度，動水圧，水平変位の時刻歴の一例 (f=5 Hz, h=23 cm, P₀=27 gf/cm²)

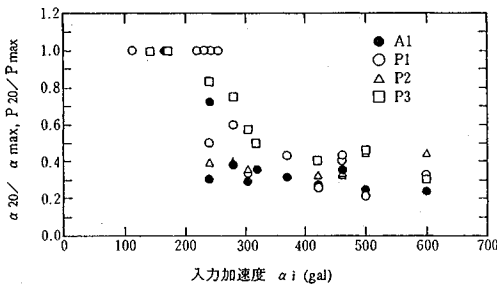


図-4 滑動による模型構造物の水平加速度，動水圧の低下率 (f=5 Hz, h=23 cm, P₀=27 gf/cm²)

また，模型構造物の加速度は図-1において右向きを正として計測しているが，正の加速度が作用している時の動水圧はP3が負圧，P6が正圧となっていることから，動水圧によって模型構造物に作用する合力は，模型構造物の片側に作用する力のほぼ2倍の大きさの力が慣性力と同じ方向に作用することが判る。

図-4は模型構造物の水平加速度A1の最大値と20波目の加速度振幅の比 (α_{20}/α_{max})，ならびに動水圧に関する最大値と20波目の振幅との比 (P_{20}/P_{max})を入力加速度 α_i に対してプロットしたもので，滑動に伴う応答の低下率を表すものである。ばらつきはあるものの，入力加速度が150~200 galを超過するといずれの振幅

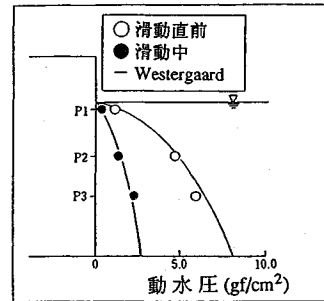


図-5 動水圧の分布と Westergaard 式との比較 (f=5 Hz, h=23 cm, P₀=27 gf/cm²)

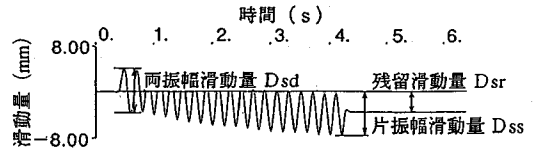


図-6 滑動量の定義

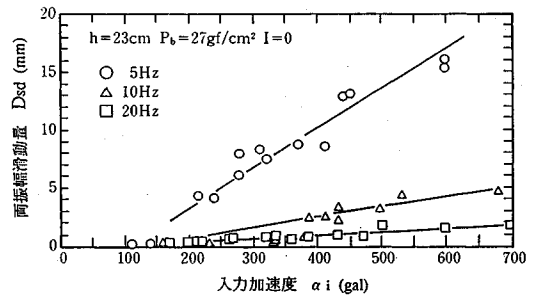


図-7 滑動量に及ぼす振動数の影響 (両振幅滑動量)

比も急激に低下している。

図-5には動水圧の鉛直分布の一例を示した。滑動によって動水圧が低下するのは先に述べた通りである。同図には Westergaard¹²⁾の動水圧評価式に滑動直前，滑動中の模型構造物の応答加速度を代入して動水圧分布を計算した結果を実線で示した。滑動直前，滑動中のいずれの場合も Westergaard 式が実験値と良い対応を示していることがわかる。

b) 滑動に影響を及ぼす諸因子に関する検討

ここでは模型構造物の滑動に影響を及ぼす因子について検討した結果について述べる。なお，本文でいう両振幅滑動量，片振幅滑動量，残留滑動量の各々の定義は図-6に示す通りとする。

図-7には，滑動に及ぼす振動数の影響を比較したものを示した。模型構造物は入力加速度がおおよそ100~150 galを超過したあたりで滑動を開始し，両振幅滑動量はこの限界加速度からの増分に対してほぼ線形的に大きくなっている。また，振動数が低いほど同一の入力加速度での滑動量は大きくなる。

図-8には両振幅滑動量と $1/(2\pi f)^2$ の関係を各入力加

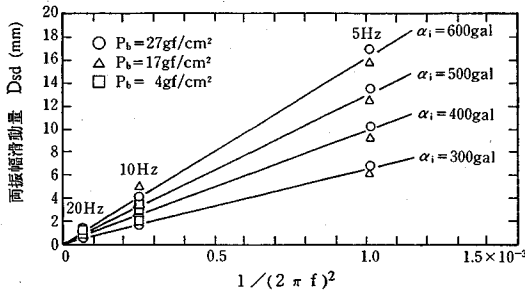


図-8 両振幅滑動量と振動数の関係 (h=23 cm)

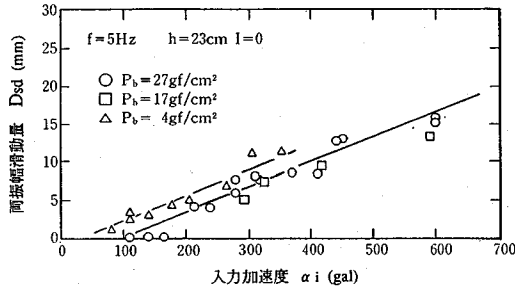


図-9 滑動量に及ぼす接地圧の影響 (両振幅滑動量)

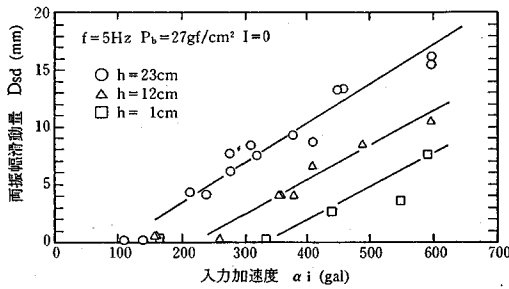


図-10 滑動量に及ぼす水深の影響 (両振幅滑動量)

速度ごとにプロットした結果を示している。いずれの入力加速度に対しても両者の関係はほぼ直線近似できることから、両振幅滑動量は振動数の2乗に反比例することが判る。

図-9には、滑動に及ぼす接地圧の影響を比較した図を示した。どの接地圧に対しても水深を $h=23\text{ cm}$ としているため、接地圧は模型内のおもりの重量を変えることによって調整した。 $P_b=17\text{ gf/cm}^2$ と 27 gf/cm^2 については、両振幅滑動量と入力加速度の関係にほとんど差異が認められないが、 $P_b=4\text{ gf/cm}^2$ の場合には、滑動を開始する限界加速度が他に比べて小さくなり、同一の入力加速度に対する滑動量は大きくなっていることから、接地圧の違いは滑動に影響を及ぼすようであることが判る。

図-10には、水深を変化させた時の両振幅滑動量と入力加速度の関係を示した。いずれの水深に対しても、接地圧は $P_b=27\text{ gf/cm}^2$ としている。水深が小さくなる

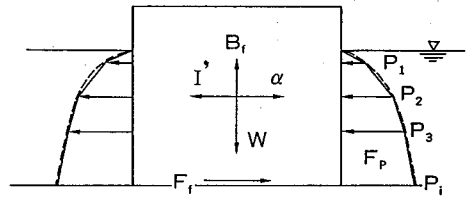


図-11 加振中に模型構造物に作用する力の概念図

ほど、滑動を開始する限界加速度は明らかに大きくなり、同一の入力加速度での滑動量は小さくなると言える。

図-11には、加振中に模型構造物に作用すると考えられる主な力の成分を示した。図中、 α : 加速度、 I' : 慣性力、 W : 自重、 B_f : 静水圧による浮力、 F_p : 動水圧による模型構造物側面に作用する力、 F_f : 摩擦抵抗力を表わすものとする。ここで、模型構造物側面に作用する動水圧が Westergaard 式に従うものとし、滑動限界加速度を α_u 、滑動を開始する時の静止摩擦係数を μ_s として、限界状態における力のつり合い条件から限界加速度を求めると次式のようなになる。

$$\alpha_u = \mu_s \cdot g \frac{1}{1 + w \cdot h \left(1 + \frac{7 \cdot h}{6}\right) / P_b^u} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 w : 水の単位体積重量

h : 水深 g : 重力加速度

P_b : 単位幅当たりの荷重強度

すなわち、限界加速度 α_u は接地圧が大きくなるほど大きくなり、また水深が大きくなるほど小さくなることを示しており、今回の実験結果はそれを裏付ける結果となっている。さて、式(1)に基づくと、水深が小さくなったり、あるいは接地圧が大きくなるに従って、滑動限界加速度 α_u は $\mu_s \cdot g$ に近づくことがわかる。これは上記の条件になるに従って、浮力や動水圧の影響が慣性力に比べて相対的に小さくなることを意味している。

図-12~14には、滑動に及ぼす基礎地盤の傾斜の影響を比較したものを示した。実験では泥岩ブロックを勾配 $I=1/50$ だけ傾けることによって傾斜を与えた。図-12は両振幅滑動量と入力加速度の関係について比較したものを示している。勾配 $1/50$ の方が若干滑動量が大きくなっているが、顕著な差とは言えない。また、今回は勾配が $1/50$ と緩勾配であったため、滑動限界加速度にもほとんど差が認められない。一方、片振幅滑動量、残留滑動量と入力加速度の関係の比較を示した図-13, 14によると、勾配 $1/50$ の方が明らかに大きい滑動量となっている。これは模型構造物が傾斜の方向に徐々に滑っていくことによるものであり、滑動量の大きさも両振幅滑動量 < 残留滑動量 < 片振幅滑動量の順に大きくなっている。

c) 振動台実験による摩擦係数の推定

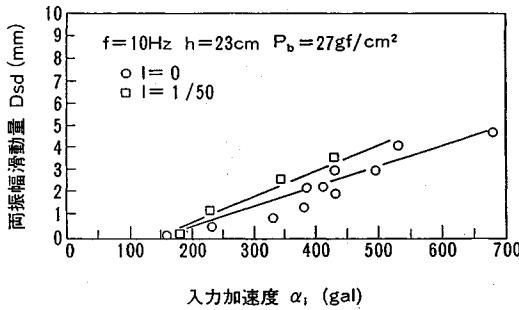


図-12 滑動量に及ぼす基礎の傾斜の影響 (両振幅滑動量)

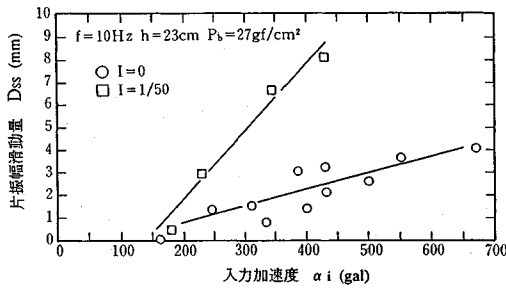


図-13 滑動量に及ぼす基礎の傾斜の影響 (片振幅滑動量)

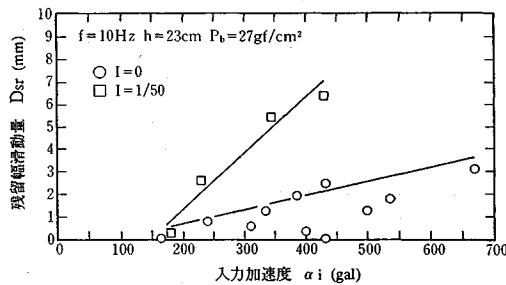


図-14 滑動量に及ぼす基礎の傾斜の影響 (残留滑動量)

図-11 に示した力のつり合い条件から、泥岩とコンクリートの接触面で発揮される摩擦係数は

$$\mu = \frac{W \cdot \alpha / g + 2F_p}{W - B_p} \dots \dots \dots (2)$$

と表される。そこで、振動台実験によって得られた加速度や動水圧の実測データから摩擦係数を求めてみた。なおここでは、滑動直前における力のつり合い条件から求められる摩擦係数を静止摩擦係数 μ_s とし、滑動によって応答加速度や動水圧が低下し、定常状態に至った時の摩擦係数を μ_{ds} と定義する。図-15, 16 には、各々静止摩擦係数、定常状態での摩擦係数とすべり速度の関係について示した。すべり速度は、模型構造物の水平変位の実測値から相対速度を計算し、その最大値の平均をもって代表値とした。なお、静止摩擦係数は本来すべり速度に依存しないと考えられるが、整理の都合上すべり速度に対してプロットしただけである。大まかな計算で

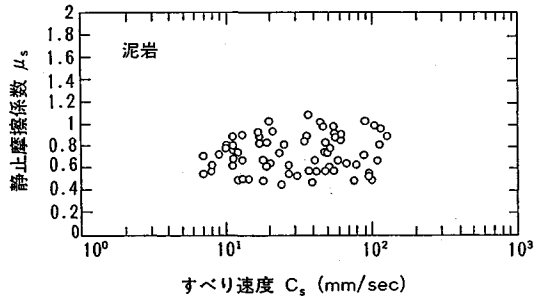


図-15 振動台実験から求められた滑動開始時の静止摩擦係数

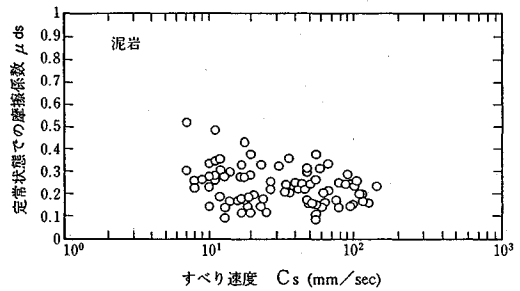


図-16 振動台実験から求められた定常状態での動摩擦係数とすべり速度の関係

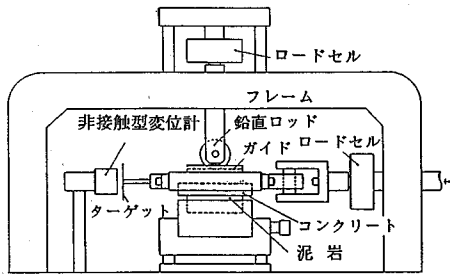
あるためデータのばらつきが大きい。定常状態での摩擦係数は静止摩擦係数に比べて小さな値となっており、静止摩擦係数が平均でおよそ $\mu_s = 0.7$ 程度であるのに対し、定常状態での摩擦係数はおよそ $\mu_{ds} = 0.2$ 程度まで低下していることがわかる。

3. 直接せん断装置を用いた泥岩とコンクリートの接触面における摩擦特性の検討

模型振動実験によれば、泥岩上で模型構造物が滑動すると、水平応答加速度は次第に低下し、ある値に漸近していくという結果になっていた。これは、泥岩とコンクリートの接触面で発揮される摩擦抵抗が一定ではなく、滑動とともに変化することを示唆している。また、模型振動実験から推定される摩擦係数は、ばらつきが大きく、その特性を把握することが困難であった。ここでは模型振動実験によって得られた知見をベースに、滑動時における泥岩とコンクリートの接触面挙動をより詳細に調べることを目的として、直接せん断装置による接触面の繰返しせん断試験を実施した結果について述べる。

(1) 実験装置と実験方法

実験に使用した直接せん断装置の概要を図-17 に示している。本装置は油圧アクチュエータによって繰返し水平力を加える方式である。上載応力ならびに摩擦抵抗応力に相当するせん断応力は、各々定格容量 50 kgf のロードセルによって測定された荷重から求める。真鍮製の下箱には直径 6 cm、深さ 3 cm の穴が中央に開けられ



図一七 繰返し直接せん断試験機の概要と計測器の配置

ており、そこに切り出された円筒形の泥岩供試体を固定し、表面を丁寧に削って水平を出す。表面寸法 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ のコンクリート供試体は、塩化ビニールでできた上箱内に固定されており、表面は模型建造物の底面の時と同じ方法で研磨されている。繰返しせん断時には、このコンクリートを固定した上箱が左右に動くことになる。上載荷重を伝達する鉛直ロッドの先端は、上箱の水平移動に伴って生ずる摩擦力を低減するためローラベアリングが取付けられている。上箱の水平変位は、定格容量 $\pm 10\text{ mm}$ の非接触型変位計によって測定される。なお、接触面の状態を振動台実験時と合わせるため、接触面が十分に水に浸るようにしている。

(2) 実験条件

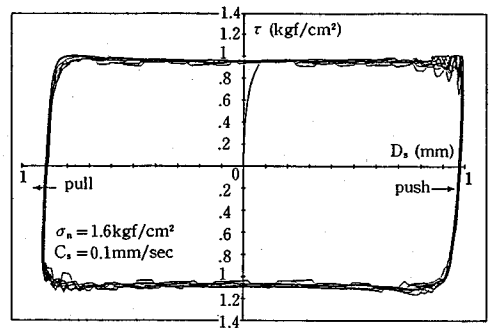
実験では次に示す通り上載応力、すべり速度をパラメータとした。

- (a) 上載応力 : $0.2, 0.8, 1.6\text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
- (b) すべり速度 : $0.1, 1, 10, 20, 50, 100\text{ (mm/sec)}$

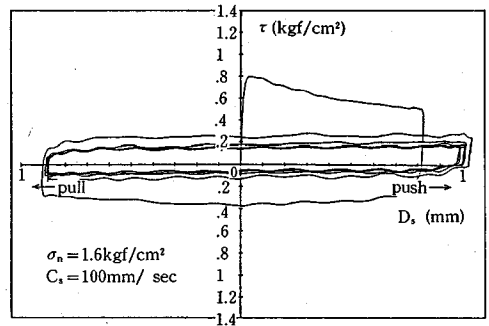
いずれのケースも同一条件で4~5回の実験を行い、再現性を確認した。泥岩は実験を通して同じ物を用いたが、各载荷毎に表面を水洗いして清掃している。繰返し荷重は正弦荷重とし、変位振幅 $\pm 1\text{ mm}$ の変位制御を採用した。なお、すべり速度は振動数や油量を調整することによって調節したが、1サイクル中のすべり速度は一定ではない。ここでは、計測されたすべり速度の最大値を代表値とした。その場合、泥岩とコンクリートの相対変位がゼロとなる付近で最大値が生ずることになる。また、すべり速度が速くなると、上箱や水平ロッドに作用する慣性力が大きくなり、水平ロードセルの出力値にその影響が含まれる可能性がある。したがって、計測された変位から計算によって加速度を求め、水平荷重に対する慣性力の補正を施した。

(3) 実験結果および考察

図一八 (a), (b) には、せん断応力とすべり変位の関係の代表例として、(a) にはすべり速度 $C_s = 0.1\text{ mm/sec}$ 、(b) には $C_s = 100\text{ mm/sec}$ の結果を示した。すべり速度が遅い場合には、繰返しに伴うせん断応力の低下がほとんど認められないのに対し、すべり速度が速い場合は、繰返しによってせん断応力が大幅に低下する

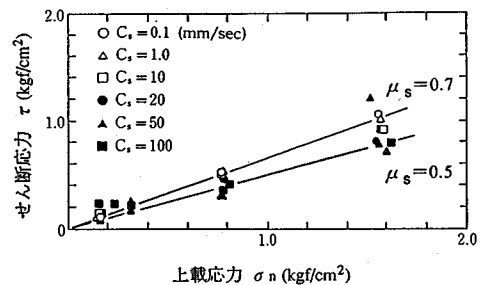


(a) すべり速度 $C_s = 0.1\text{ mm/sec}$



(b) すべり速度 $C_s = 100\text{ mm/sec}$

図一八 せん断応力とすべり変位の関係



図一九 すべり開始時の静止摩擦に相当するせん断応力と上載応力の関係

ことが判る。この結果は、泥岩とコンクリート間の摩擦係数がすべりの繰返しとともに変化し、それはすべり速度に依存することを示している。特にすべり速度が速い時のせん断応力の低下は、振動台実験での滑動による応答加速度の低下現象を支持するものである。図一十九、20にはそれぞれ最初にすべりが生ずる時の静止摩擦、ならびにすべりを繰返して定常状態に至った時の摩擦に相当するせん断応力と上載応力の関係を示している。静止摩擦については若干ばらつきがあるものの、特徴的な差は認められず、ほぼ原点を通る直線として表現できる。この直線の勾配は静止摩擦係数 μ_s に相当し、今回はおよそ $\mu_s = 0.5 \sim 0.7$ となっていることから振動台実験での μ_s とほぼ一致すると言える。一方、定常状態での摩

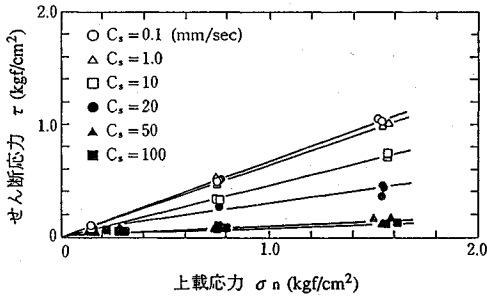


図-20 定常状態での動摩擦に相当するせん断応力と上載応力の関係

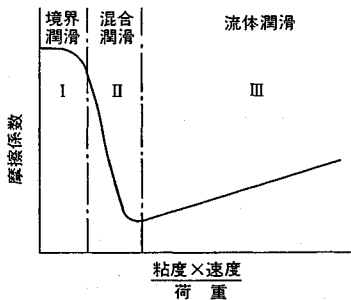


図-21 ストライバック曲線の概念図¹³⁾

摩擦係数については、すべり速度が10 mm/secを超えたあたりから直線の勾配の低下が大きくなり、すべり速度の増加に伴って摩擦係数が小さくなっている。

ところで、上述したような湿潤状態にある滑らかな接触面での摩擦現象は、機械工学の分野においてトライボロジーという摩擦・潤滑・摩擦現象を総合的に扱う学問体系となっている。図-21はトライボロジーで用いられるストライバック曲線¹³⁾を表わしたもので、2つの固体面がある流体を介して接触している時の摩擦係数の変化を概念的に示したものである。図の横軸は(流体の粘性 η)×(すべり速度 C_s)/(上載荷重 P)という無次元量を表わしている。このストライバック曲線は、摩擦係数の変化の特徴から次の3つの領域に分けられる。

境界潤滑領域 (I)：接触面のほぼ全域にわたって固体同志の直接接触が起こっており、接触面に介在する流体の流れが存在しない状態。

混合潤滑領域 (II)：接触面のある領域では境界潤滑が、その他の領域では流体潤滑が発生している遷移状態。

流体潤滑領域 (III)：高速ですべりが生じているため固体同志の接触が少なくなり、接触面に介在する流体が一種の潤滑効果を生み出している状態。この場合、速度の増加によって流体の粘性抵抗が増加する。

そこで、今回の実験では水が接触面における介在流体であるとみなし、一連の直接せん断試験結果をストライバック曲線の考え方に基づいて整理したのが図-22である。ここでは水の粘性係数を $\eta = 1.33 \times 10^{-4}$ (kg ·

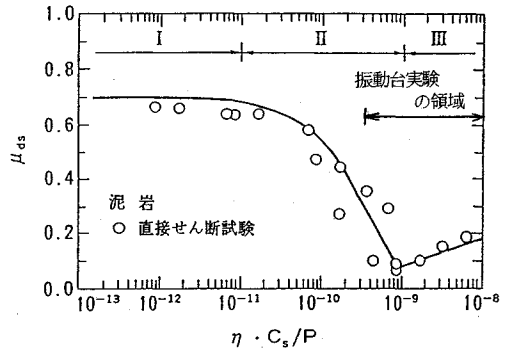


図-22 直接せん断試験によって得られた泥岩とコンクリート間の摩擦特性に関するストライバック曲線

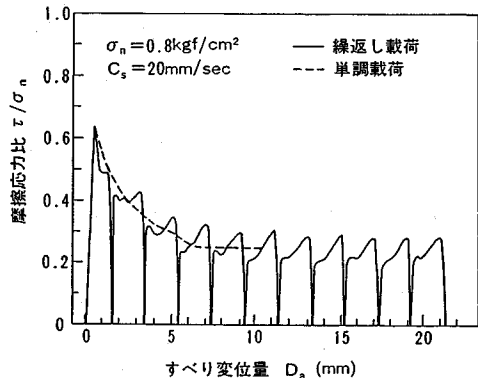


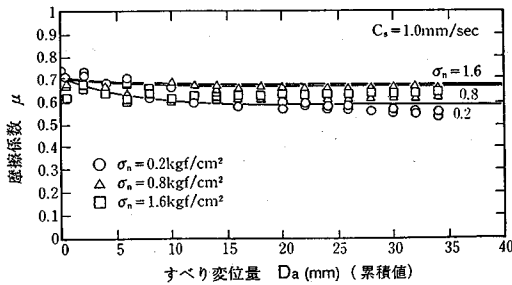
図-23 摩擦応力比とすべり変位量の関係

sec/m²)とした。実験結果は、ストライバック曲線の特徴を反映しており、 $\eta \cdot C_s / P$ が 10^{-11} を超えたあたりから混合潤滑状態になって、摩擦係数は急激に低下し、 10^{-9} を超えると逆に摩擦係数が漸増していることから流体潤滑の状態になっていると推測される。

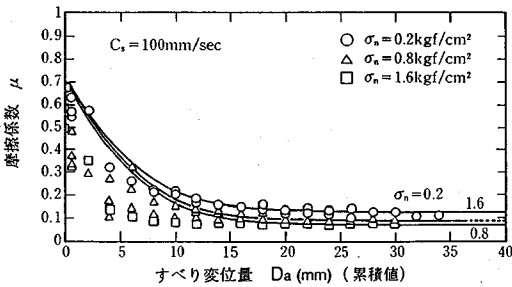
図-23には、上載応力 $\sigma_n = 0.8$ kgf/cm²、すべり速度 $C_s = 20$ mm/secの時の摩擦応力比 τ / σ_n とすべり変位量 D_s の関係を示した。すべり変位量は、繰返し載荷時の変位の絶対値を順次加えた累積値を表わしている。また、同図には同じすべり速度で一方に単調載荷した時の実験結果も併記している。繰返し載荷試験ですべりが生じている時の摩擦応力比を連ねると、摩擦係数とすべり変位量の関係とみなすことができるが、その曲線は単調載荷時の曲線とほぼ一致しており一種の骨格曲線とみなしうる事が判る。

4. 泥岩とコンクリートの接触面における摩擦特性の定式化

3.の結果より、水を介在した泥岩とコンクリートの接触面を繰返しせん断した時に接触面で発揮される摩擦係数はすべり速度によって変化し、定常状態に至った時の摩擦係数の特性は、ストライバック曲線の利用



(a) すべり速度 $C_s = 1.0 \text{ mm/sec}$



(b) すべり速度 $C_s = 100 \text{ mm/sec}$

図—24 各すべり速度での摩擦係数とすべり変位量の関係

することで統一的に評価できることが判った。また、摩擦係数の変化は摩擦係数—すべり変位量の関係の骨格曲線によって表現されることが示された。ここでは、実験結果に基づいて接触面における摩擦特性の定式化を行う。

図—22 に示したストライバック曲線より、定常状態における摩擦係数 μ_{as} は次のように定式化される。

$$\mu_{as} = \exp\left\{-2.5 \times 10^9 \left(\frac{\eta \cdot C_s}{P}\right) - 0.36\right\}, \frac{\eta \cdot C_s}{P} \leq 10^{-9} \quad (3)$$

$$\mu_{as} = 0.1 \cdot \log\left(\frac{\eta \cdot C_s}{P}\right) + 0.95, \frac{\eta \cdot C_s}{P} > 10^{-9} \quad (4)$$

ここに、 η ：水の粘性係数 ($1.33 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$)

C_s ：すべり速度 (m/sec)

P ：荷重強度 (kg/m)

また、摩擦係数 μ は静止摩擦係数 μ_s から、すべり変位量が増加するに従って定常状態における摩擦係数 μ_{as} に漸近するように変化することから

$$\mu = \frac{2 \cdot (\mu_s - \mu_{as})}{1 + \exp(a \cdot D_a)} + \mu_{as} \quad (5)$$

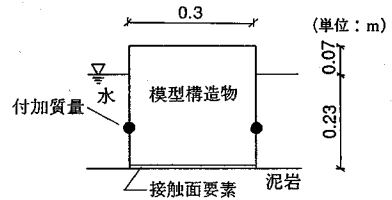
ここに、 μ_s ：静止摩擦係数

μ_{as} ：定常状態での摩擦係数 ((3), (4))

D_a ：すべり変位量 (mm)

a ：定数

と表わすことにする。上式を用いて摩擦係数 μ とすべり変位量 D_a の関係について実験値と計算値を比較した例を図—24 に示した。提案式によって摩擦特性が概ね良好に表現されていると言える。



図—25 シミュレーション解析用の解析モデルの概要

表—2 シミュレーション解析の解析条件

振動数 f (Hz)	波数 N	継続時間 T (sec)	入力加速度 α_i (gal)
5	10	2	400
			500
			600
10	15	1.5	400
			500
			600
20	11	0.6	400

5. 模型振動実験の数値シミュレーション

直接せん断試験機を用いた繰返しせん断試験から泥岩とコンクリートの接触面における摩擦特性を詳細に検討し、これらの実験結果に基づいて摩擦特性の定式化を行った。ここでは、4. で示した関係式を用いて模型振動実験の数値シミュレーションを行い、接触面モデルの妥当性を検討する。

(1) 解析方法

a) 解析モデルと解析ケース

解析は二次元平面ひずみの有限要素解析であり、解析モデルを図—25 に示す。模型構造物の寸法は幅 0.3 m、高さ 0.3 m で実験時と対応している。模型構造物と泥岩の接触面には厚さ 1 cm のソリッド要素が存在し、ここに 4. で述べた構成関係が適用される。動水圧は、Westergaard 式に基づくとして次式に従って付加質量として評価する。

$$M_a = \int_0^h \frac{W(z)}{\alpha} dz = \frac{7\gamma_w h^2}{12g} \quad (6)$$

ここに、 M_a ：単位奥行き当たりの付加質量、

$W(z)$ ：動水圧、 α ：水平加速度、 h ：水深

g ：重力加速度、 γ_w ：水の単位体積重量

また、動水圧による力の作用点の水深は、 $h_G = 3h/5$ と表されることから、図—25 の●で示した $h = h_G$ に相当する節点に式(6)の付加質量を与えた。解析ケースは表—2 に示すものとする。ただし、入力加速度 400 gal のケースのみ実験時に泥岩上で計測された記録を入力波形として採用した。

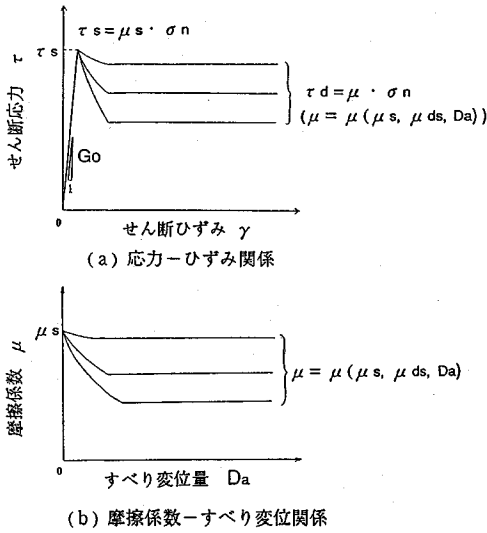


図-26 接触面における構成関係の概念図

b) 接触面要素の構成関係

接触面要素に対する構成関係の概念図を図-26に示す。応力-ひずみ関係は(a)に示す通り、静止摩擦に相当するせん断応力までは一定剛性 G_0 の線形関係とし、滑動を開始するとせん断応力は徐々に低下して最終的には定常状態での摩擦係数に相当するせん断応力に収束していくものとする。ただし、この定常状態での摩擦係数 μ は式(3), (4), (5)に従って(b)に示すように、すべり速度やすべり変位量に応じて変化するものとする。

c) 入力物性値

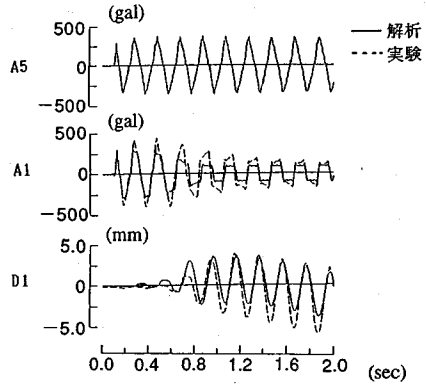
接触面要素の初期剛性 G_0 は、直接せん断試験のせん断応力が厚さ1 cmの要素に作用した時、両者の変位が等しくなるように決定した。その結果 $G_0 = 200(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ となった。また直接せん断試験結果より、 $\mu_s = 0.7$, $a = 0.25$ としたが、 μ_{ds} の評価に当っては数値解析時にすべり速度を逐次計算し、式(3), (4)により求めることにした。模型構造物については $E = 10^6(\text{kgf}/\text{cm}^2)$, $\nu = 0.4$ とし剛体に近いものとした。

d) 数値解析法

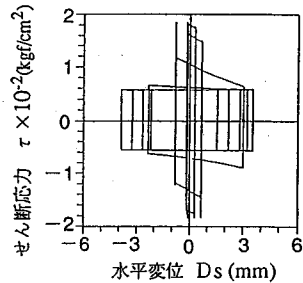
時間領域における数値積分は Newmark β 法を採用した。その際、パラメータは $\beta = 1/4$, $\delta = 1/2$ とし、時間ステップは1000分の1秒とした。また、模型構造物が滑動している時には、接触面要素の剛性を $G_0 \times 10^{-6}$ に低下させ、収束計算を行うことによって変位の誤差を小さくするようにした。

(2) 解析結果

図-27には、 $f = 5 \text{ Hz}$ 、入力加速度が約400 galの解析結果を示している。(a)には加速度や変位の時刻歴に関する実験値と解析値の比較を、(b)は接触面要素



(a) 加速度、滑動変位の時刻歴



(b) 接触面要素のせん断応力-水平変位関係

図-27 シミュレーション解析結果の一例 ($f = 5 \text{ Hz}$, $h = 23 \text{ cm}$, $P_s = 27 \text{ gf}/\text{cm}^2$)

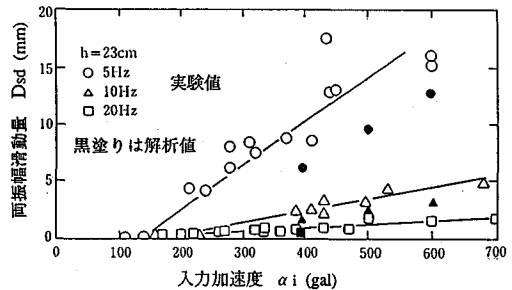


図-28 両振幅滑動量と入力加速度の関係に対する実験値と解析値の比較

のせん断応力-水平変位の関係を示した。模型構造物の滑動に伴って、応答加速度、接触面でのせん断応力が低下するとともに滑動変位の振幅が増加し、応答加速度が定常状態となったあたりで、変位振幅もほぼ一定値となることから、模型実験時に見られた特徴が良好に表現されていると言える。図-28には両振幅滑動量と入力加速度の関係について、実験結果と解析結果の比較を示した。滑動量の大きさは全体的に解析結果の方が小さめの値になっており、実験結果のばらつきの下限值付近に相当しているが、概ね妥当な滑動量が計算されていると評価できる。

6. 結 論

海底の泥岩地盤上に軟着底方式で剛体基礎が建設された場合の地震時滑動に関する基本的特性を検討するために小型模型振動実験、直接せん断試験を行って、滑動に伴う応答の変化、滑動に及ぼす諸因子の影響を調べるとともに、接触面での摩擦特性の定式化を行った。また、それらの結果に基づいて、模型振動実験の数値シミュレーションを実施した。本研究から得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) 模型構造物の滑動に伴い、応答加速度や動水圧は低下する。

(2) 滑動は入力加速度がある限界値に到達した時に発生し、その量は入力加速度が大きいかほど大きくなる。

(3) 振動数、接地圧、水深は滑動量に影響を及ぼし、振動数、接地圧が低いほど、また水深が大きいかほど滑動量は大きくなる。

(4) 基礎地盤の傾斜は、片振幅滑動量、残留滑動量に大きな影響を及ぼす。

(5) 泥岩とコンクリートの接触面で発揮される摩擦係数は、接触面に水のような流体を介在する場合すべり速度によって変化し、すべり速度が速いほど滑動中の摩擦係数は低下する。

(6) 直接せん断試験結果に、トライボロジーの概念を導入して、水を介在した泥岩とコンクリートの接触面における摩擦係数の定式化を行った。

(7) 定式化された摩擦特性に関する構成関係を用いたFEM解析によって模型振動実験の数値シミュレーションを行い、接触面のモデル化に対する妥当性を確認した。

(8) 今後は、より大規模な模型実験や、泥岩以外の岩を用いた実験を実施して、データを蓄積する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 上部達生・守屋正平・工藤勝己：剛基礎上の重力式係船岸の地震時滑動量推定手法の実験的研究，港湾技術研究所報告，第27巻，第2号，pp.211～240，1988.
 - 2) 志波由紀夫・藤井俊二・泉博允：構造物の地震時滑動に関する実験および解析，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.669～672，1985.
 - 3) 藤井俊二：免振効果を考慮した着底型人工島の試設計，土と基礎，第34号，1号，pp.49～55，1986.
 - 4) Uesugi, M. and Kishida, H.: Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sand, *Soils & Foundations*, Vol.26, No.2, pp.33～46, 1986.
 - 5) Uesugi, M. and Kishida, H.: Frictional Resistance at Yield between Dry Sand and Mild Steel, *Soils & Foundations*, Vol.26, No.4, pp.139～149, 1986.
 - 6) 白阪靖人・山下利夫・原和夫・清田芳治・鈴木康嗣：砂および泥岩とコンクリート間の摩擦特性，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.281～282，1986.
 - 7) 藤野陽三・佐々木有三・伯野元彦：地震動による物体のすべりについて，東大震研彙報，Vol.53，pp.461～480，1978.
 - 8) 土岐憲三・佐藤忠信・三浦房紀：強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動，土木学会論文報告集，第302号，pp.31～41，1980.
 - 9) 土岐憲三・三浦房紀：地盤一構造物の非線形地震応答解析，土木学会論文報告集，第317号，pp.61～68，1982.
 - 10) Zaman, M., Desai, C. and Drumm, E.C.: Interface Model for Dynamics Soil-Structure Interaction, *J. of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.9, pp.1257～1273, 1984.
 - 11) Carter, J. P. and Ooi, L.H.: Application of Joint Model to Concrete-Sandstone Interface, *Numerical Method in Geomechanics*, Innsbruck, pp.889～893, 1988.
 - 12) Westergaard, H. M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, *Trans. ASCE*, Vol.98, pp.418～472, 1933.
 - 13) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，1985.
- (1993.5.14 受付)

SLIDING OF NEARSHORE RIGID FOUNDATION OF LOW BEARING PRESSURE ON MUD STONE DURING EARTHQUAKES

Mamoru KANATANI, Koichi NISHI, Mizuaki AOYAMA and Masayuki OHNAMI

In case of construction of gravity structures in nearshore space, it is an important problem whether the structure slides or not during earthquakes owing to its buoyant force. This paper firstly describes the results of shaking table tests to investigate the sliding phenomena between the gravity structure model and mud stone during excitation. Secondly the characteristics of coefficients of static and dynamic friction at the contact surface between concrete and mud stone were studied using the direct shear testing apparatus. Furthermore, several numerical simulations of shaking table tests were performed by introducing the constitutive relation based on the experimental results.