

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 23

NO. 3

SEPT. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第23巻 第3号 (Vol.23, No. 3) 1984年9月 (Sept. 1984)

目 次 (CONTENTS)

1. Multiple Longshore Bars Formed by Long Period Standing Waves
..... Kazumasa KATOH..... 3
(反射定常波による多段沿岸砂州の形成.....加藤 一正)
2. 防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究
.....谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行.....47
(Experimental Study of Random Wave Forces on Upright Sections of Breakwaters
..... Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Kazuyuki MYOSE)
3. 共振振動三軸試験装置の開発と混合土の動的変形特性
.....善 功 企・梅原靖文・大根田秀明・樋口嘉章..... 101
(Development of Resonant-cyclic Triaxial Testing Apparatus and Dynamic
Deformation Characteristics of Mixtures
..... Kouki ZEN, Yasufumi UMEHARA, Hideaki OHNEDA and Yoshiaki HIGUCHI)
4. 波の繰り返し载荷を受ける粘性土地盤の安定性に関する実験的研究
.....大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章・入澤一明..... 127
(Experimental Studies on Model Clay Ground Subjected to Cyclic Wave Loading
..... Hideaki OHNEDA, Yasufumi UMEHARA, Yoshiaki HIGUCHI
and Kazuaki IRISAWA)
5. 水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究
.....上部達生・檜垣典弘..... 153
(An Experimental Study on Sliding Block in Water during Earthquake
..... Tatsuo UWABE and Norihiro HIGAKI)
6. 座標式工程表による工程計画手法の開発
.....奥山育英・佐藤恒夫..... 187
(Time Space Scheduling Model
..... Yasuhide OKUYAMA and Tsuneo SATO)

7. 港湾経済効果の計測手法（第3報）——利用効果の帰属——
.....稲村 肇..... 235
(Measuring the Economic Benefits of Port Development
.....Hajime INAMURA)
8. 港湾工事の産業連関分析
.....稲村 肇・米澤 朗・高橋 淳弘..... 251
(The Economical Impact Analysis of Port Construction Works by Input-Output
Analysis.....Hajime INAMURA, Akira YONEZAWA and Atsuhiko TAKAHASHI)

5. 水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究

上 部 達 生*
檜 垣 典 弘**

要 旨

水中の剛体の地震における滑動挙動を検討するために、振動箱内の水中に置いたモルタル製剛体模型の振動実験を実施した。この振動実験によれば、剛体模型の加速度および動水圧は滑動を開始するとほぼ瞬間的に減少し、滑動中はほぼ一定値をとるような波形を示した。水中の剛体模型の片面に作用する動水圧の2倍を重力加速度で除した値に等しい付加質量を考慮して振動実験の結果より静摩擦係数、動摩擦係数を求めた。これらの値はオイラーの方法による摩擦係数測定実験の結果と近い値となった。このことから、水中の剛体の地震時の滑動を検討する場合には、剛体に作用する動水圧を重力加速度で除した値に相当する付加質量を考慮すればよいものと考えられる。以上の結果より、剛体がのっている基礎の水平、上下加速度より剛体の地震時滑動変位量を計算する手法を示し、振動実験結果との比較検討からこの計算手法がほぼ妥当な結果を与えることを確認した。

* 構造部 地震防災研究室長

** 構造部 地震防災研究室

5. An Experimental Study on Sliding Block in Water during Earthquake

Tatsuo UWABE*
Norihiko HIGAKI**

Synopsis

Shaking table tests of model blocks were conducted to study sliding behavior of a block in the water during earthquakes. According to shaking table tests, the accelerations and the hydrodynamic pressures on the model block decreased instantaneously on set of sliding and remained the same levels during sliding. The static and dynamic coefficient of friction obtained from the vibration tests in consideration of the added mass of which inertia force corresponded to the hydrodynamic pressures on the model block were almost the same values as those measured by Euler's method. Based on above mentioned results a method to estimate the displacement of the sliding block during earthquakes was presented. The displacements calculated from the horizontal and vertical base accelerations showed relatively good agreement to the observed values.

* Chief of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structures Division

** Member of Earthquake Disaster Prevention Laboratory, Structures Division

目 次

要 旨	153
1. まえがき	157
2. 剛体模型	158
3. 静摩擦係数測定のための水平引張試験	160
3.1 試験内容	160
3.2 試験結果	160
4. オイラーの方法による動摩擦係数測定実験	160
4.1 実験内容	160
4.2 実験結果	161
5. 水中の剛体模型の地震時滑動実験	162
5.1 振動台	162
5.2 模型および測定器	162
5.3 加振条件	163
5.4 実験内容	163
6. 水中の剛体模型の地震時滑動実験結果	164
6.1 振動中の剛体模型の滑動	164
6.2 剛体模型の振動特性	170
6.3 剛体模型に作用する動水圧	179
6.4 滑動実験から得られる摩擦係数	179
7. 剛体の地震時滑動変位量計算手法	181
7.1 剛体の地震時滑動変位量計算手法について	181
7.2 剛体の地震時滑動変位量の計算結果と実験結果の比較	182
8. 結 論	183
9. あとがき	186
参考文献	186
記号表	186

1. まえがき

振動実験により水中および水がない状態での剛体の地震時の滑動現象を把握し、さらに剛体の地震時滑動変位量計算手法を振動実験結果により検証した結果を報告する。以下には、まず研究の背景についてふれ、さらに過去の研究成果を紹介し、そして、この報告の概要を記述する。

最近、東海地方に大規模な地震が近い将来発生する可能性が高いと指摘され、これをうけて地震防災対策調査の一環として、既存の港湾・海岸保全施設の耐震性の調査が実施されている。この調査では土田他によりとりまとめられた港湾・海岸施設耐震性調査手法¹⁾により、各施設の耐震性評価が行われている。耐震性評価というのは、特定の地震により既存の施設が受けるであろう影響を検討することをいい、まず特定の地震に対して各施設が被災するか否かの検討が行われる。地震防災対策を実施する場合、各施設の被災の有無の検討に続いて、どの程度の被災を受けるか、すなわち被災変形量を推定することも重要である。港湾・海岸施設耐震性調査手法には、施設の被災の有無を判定する手法は具体的に示されているが、被災変形量推定手法については言及されていない。この被災変形量推定手法については、過去の地震被災事例に基づいて検討した報告²⁾があるが、想定される地震動から直接被災変形量を計算する手法も望まれている。被災変形量を推定しようとする港湾構造物の1つに重力式構造物がある。重力式構造物の主要な被災形態の1つは滑動による被災である。このため、重力式構造物の地震時の滑動変位量を推定する手法が必要とされている。この報告は地震時における重力式構造物の滑動変位量計算手法の基礎資料を与えようとするものである。

近年、海洋空間の利用拡大とともに、海洋に建設される構造物はその設置水深の増大により巨大化してきている。釜石港の湾口では水深60mのところらに防波堤の建設が予定されており、その構造はケーソンを捨石堤の上に設置したケーソン式混成防波堤となる見込みである。大水深になれば地震時に作用する動水圧が大きくなり、混成式防波堤のケーソンの滑動を許容しないとすればケーソンの幅を著しく大きくしないと安定を保てないことになる。港湾の施設の技術上の基準・同解説³⁾によれば、地震時に堤体が滑動した場合、その方向が一方向だけでなく逆方向もあること、地震動の継続時間が短いこと、マウンド肩幅は数メートルもあり堤体がマウンドからはずれることはないこと、堤体の多少の移動は防波堤の機能に対してほとんど影響がないことから、堤体の滑動は

一般に問題とならないとされている。また、諸外国の海洋構造物の設計基準においては、設計において滑動および転倒に対するチェックをしないものもある。以上のことを考慮すれば地震時に滑動を許容して設計することも考えられる。ただし、津波防波堤のように地震直後の機能が重要視されるものは言うまでもないが、重要な大規模構造物である場合には我が国が地震多発国であることを考慮して、地震時の滑動を許容するにしてもその滑動変位量がどの程度になるかを検討しておくことが必要である。地震時の滑動変位量計算手法の詳細な検討が望まれる。また、水中での剛体の地震時の滑動に関しては、滑動に与える水の影響、滑動開始後に剛体に作用する動水圧等について検討しておく必要がある。

以上がこの報告の研究を必要とする背景であるが、以下には地震時の滑動変位量に関する過去の研究成果について述べる。Newmark⁴⁾は1965年のRankin Lectureにおいて、変位法による斜面安定の検討手法を示している。ここでNewmarkは剛体の地震時における相対変位を、最大加速度を等しくした4つの地震記録を用いて計算し、こうして求まった最大変位量を、剛体が滑動するときの加速度と入力最大加速度の比に対して示している。

FranklinとChang⁵⁾は169の地震記録についてNewmarkの方法で最大変位量の計算を行っている。RichardsとElms⁶⁾は、このFranklinとChangの計算結果より最大変位量が次式により計算されるとして、重力式擁壁のある変位量におさえるように設計する手法を示している。

$$d = 0.087 \frac{V^2}{Ag} \left(\frac{N}{A} \right)^{-4} \quad (1)$$

ここに、 d ：最大変位量 (inches)

V ：最大速度 (in./s)

A ：入力地震度 (最大加速度/重力加速度)

N ：滑動するとき地震度

g ：重力加速度 (32.2ft/s²)

SimとBerril⁷⁾は振動台を用いた擁壁の模型実験により、RichardsとElmsの設計方法の検証を実施している。一方、MakdisiとSeed⁸⁾はNewmarkの方法に堤体の加速度応答を考慮した変位法による斜面の安定解析手法を提案している。

我が国では藤野、佐々木、伯野⁹⁾が地盤あるいは基礎の上に剛体に乗ったモデルについて地震動による物体のすべりについて検討している。いくつかの地震波形について上下動を考慮して、動摩擦係数と静摩擦係数の比を

かえてすべり変位量を計算している。一方、土岐、佐藤、三浦¹⁰⁾は Goodman, Taylor と Brekke¹¹⁾の定式化した Joint 要素を用いて、強震時における地盤と構造物の剝離と滑動について検討している。以上の研究成果では、動摩擦係数と静摩擦係数の値、両者の関係が詳しく検討されていない。また、Sim と Berrill の研究以外は剛体の地震時滑動量推定手法の実験的検証は行われていない。さらに水中での剛体の地震時滑動については検討されていない。これらの過去の研究成果であまり検討されていない点について詳しく検討しようとするのが本報告である。

この報告では港湾構造物の地震時滑動変位量を検討する第1段階として、振動実験により水中の剛体の滑動現象を把握し、剛体の地震時滑動変位量の計算手法の妥当性を検証することとしている。ここで対象としているのは水に接している重力式の港湾構造物であり、具体的には水中の捨石上のコンクリートケーソンが考えられている。こうした構造物の地震時滑動変位量を計算するときにはこの報告の検討する事項以外に次のような問題点が考えられる。

- i) 重力式岸壁の場合の背後に作用する地震時土圧。
- ii) 重力式岸壁のケーソンに作用する外力が偏心すること。
- iii) 捨石上のケーソンが水平に滑動しないで捨石に斜めにめり込むように移動する可能性があること。

以上の問題点をこの報告での検討事項と同時に検討するのは実験が複雑となりすぎる。そこで、簡単なモデルから着手することとし、振動台上に固着したアクリル板あるいはモルタル板上のモルタル製の剛体模型について、空中および水中での振動実験を実施した。ここで言う水中とは剛体模型の天端近くまで振動箱内に水を注入した場合で、水がない状態を空中、水なし、水深 0 cm で示す。

剛体の地震時滑動変位量の計算手法を検証するために

は、実施した振動実験の結果から剛体の滑動現象を明らかにし、これをふまえて与えられる推定手法の計算結果が実験結果と一致するか否かを検討しなければならない。また、この場合には滑動変位量計算手法に用いる摩擦係数についても十分検討しておく必要がある。以上のことをふまえて、この報告での内容は大きく三つに分かれる。最初に摩擦係数の測定実験とその結果について述べ、次に、振動実験による剛体の滑動現象を把握し、最後に剛体の地震時滑動変位量の計算手法の検証について述べる。ここで実施している摩擦係数の測定実験は、実際の重力式構造物の滑動量計算のためのデータを用意するためのものではなく、振動実験による剛体の滑動現象把握と剛体の地震時滑動変位量の計算手法の検証のために必要となるデータを示している。

摩擦係数の測定のために二種類の実験を行った。まず、静摩擦係数の測定のために剛体模型の水平引張試験を行った。次にオイラーの方法による動摩擦係数の測定実験を実施した。これらの結果についてまず記述する。振動台を用いた実験では正弦波加振および地震波加振を行った。まず、水のない場合について行い、次に剛体模型の高さより少し低い水深での実験を実施した。この振動実験結果を検討し剛体の滑動現象の把握を行った。これをふまえて、剛体の地震時滑動変位量を計算するための考え方と手法の検討を行い、その妥当性の検証を実施した。

2. 剛体模型

実験では表-1に示すような3種類で4つの模型(A, B1, B2, C模型)を用いた。表-1には模型の単位体積重量(小数点以下第2位が四捨五入された値)、模型の形状、模型の重量(後述する測定器を含んだ値も示してある)、模型が使用された実験名が示されている。表-1で示した4個の模型のうち、剛体模型Aは今回の実験のために新しく作られたものである。他の3個の模型は筆者

表-1 剛 体 模 型

模 型	単位体積重量 (gf/cm ³)	高さ×幅×奥行 (cm)	重 量 (kgf)		対象とした実験		
			測定器なし	測定器含む	水平引張 試験	オイラー の方法に よる実験	滑動実験
A	1.6	5×23×30	5.5	5.9			○
B 1	1.6	28×23×30	30.7	31.9	○	○	
B 2	1.6	〃	31.3	32.5		○	○
C	2.1	〃	40.4	41.6	○		

らが以前に実施した大型混成式防波堤の模型振動実験¹²⁾に用いたコンクリートケーソン模型を転用したものである。それぞれの模型の特徴は以下のとおりである。剛体模型Aは剛体の滑動挙動を明確に把握することを目的として作成した高さの小さい模型である。剛体模型B1とB2は同一種類の模型であるがやや重さが異なっている。剛体模型Cは他の3個の模型より重くなっている。3.以降に示す各種実験では実験ごとに表-1に示した剛体模型のいくつかを用いている。各実験で用いた剛体模型

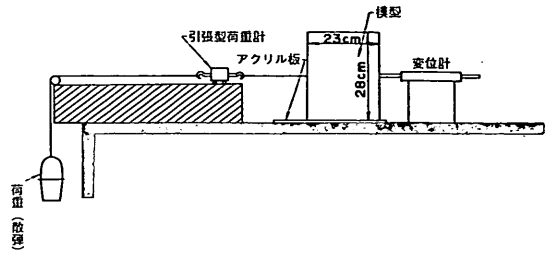


図-1 水平引張試験

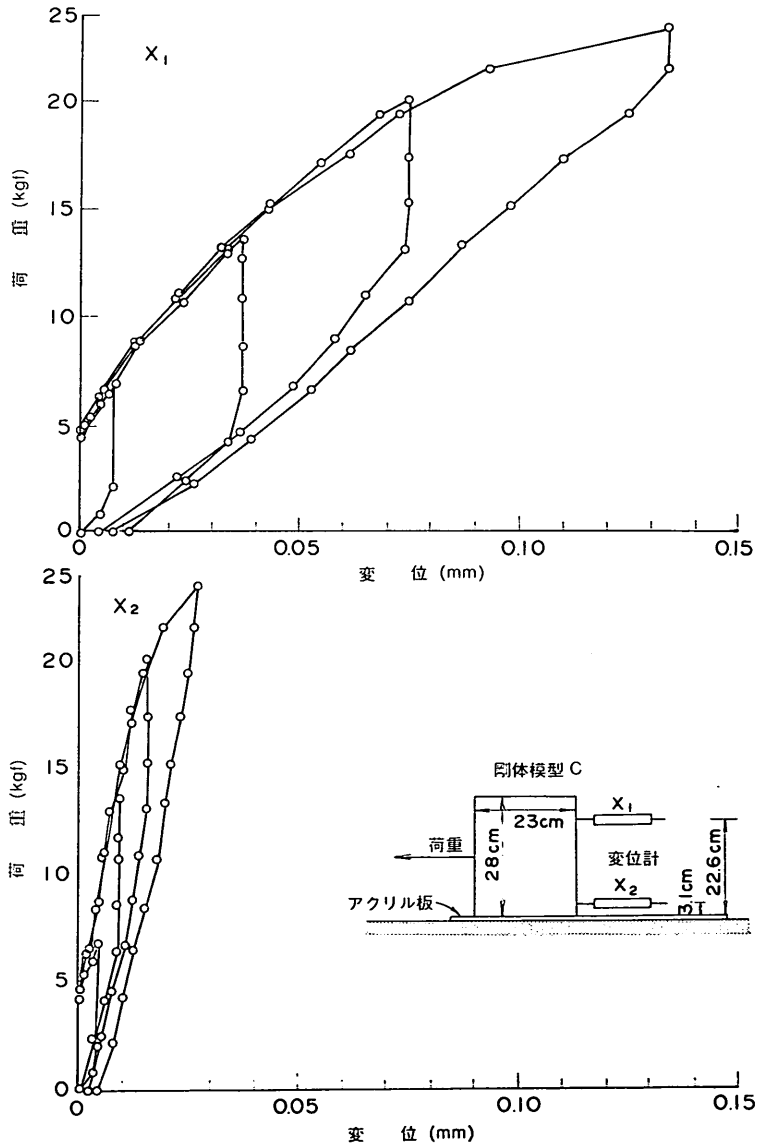


図-2 荷重—変位曲線

は表-1に示すとおりである。

表-2 水平引張試験結果

3. 静摩擦係数測定のための水平引張試験

3.1 試験内容

図-1に水平引張試験の剛体模型および測定器の配置を示す。同試験は静摩擦係数を測定するための試験である。台の上に厚さ3mmの亚克力板を固定し、その上に剛体模型をのせ、片方から水平に剛体模型を引張った。引張荷重の載荷は図の左に示す容器に散弾(直径約2mmの鉄球)を少量ずつ投入していくことにより行った。この荷重は図に示すように引張型荷重計で測定した。引張型荷重計にはひずみゲージ式荷重変換器で定格容量が50kgfのものをを用いた。変位計には差動トランス式慣通コア型で定格変位25mmのものをを用いた。両方とも動ひずみ測定器に持続し、増幅した出力を電磁オンログラフに記録した。試験では剛体模型と亚克力板の接触面は乾燥状態と水に浸した状態の2種類とした。水に浸した状態は、亚克力板上約1cmまで水を満たすことにより実現した。水に浸した状態の水平引張試験は、後述の水中の剛体模型の振動実験に対応するものである。

3.2 試験結果

図-2には水平引張試験で載荷と除荷を繰り返したときの荷重-変位曲線の1例を示す。図の上半分は剛体模型の下端から22.6cmの位置の変位、下半分は同じく3.1cmの位置の変位である。図に示すようにある荷重に達するまで剛体模型は変位せず、それ以降荷重に応じて変位は徐々に増大する。除荷でも同様にある荷重に下がるまで剛体模型は変位せず、それ以降荷重が下がるのに応じて変位は減少する。剛体模型の変位は除荷終了後も完全には0にもどらず、残留する。この残留変位は載荷の繰り返しにより累積するが、図-2では各回の載荷開始時の残留変位を差し引いて示してある。

載荷重をさらに増大させていくと、ある時点で剛体模型の変位は一気に急増する。この変位が急増するときを滑動開始と考え、このときの荷重を記録紙から読み取り、摩擦係数を求めた。

試験結果を表-2に示す。表-2によれば、剛体模型B1の静摩擦係数の平均値は0.52(標準偏差は0.02)、剛体模型Cの静摩擦係数の平均値は0.63(標準偏差は0.02)であった。なお、水に浸した状態での試験によれば、4回の試験の静摩擦係数の平均値は0.52であり、亚克力板上の水の有無による摩擦係数の値の変化はないものと考えられる。

剛体模型	実験 No.	静 摩 擦 係 数		
		測 定 値	平 均 値	標 準 偏 差
B 1	1	0.47	0.52	0.03
	2	0.50		
	3	0.49		
	4	0.50		
	5	0.53		
	6	0.53		
	7	0.54		
	8	0.55		
	9	0.54		
C	1	0.62	0.63	0.02
	2	0.63		
	3	0.63		
	4	0.59		
	5	0.64		
	6	0.65		
	7	0.64		
	8	0.62		
	9	0.61		
	10	0.67		

4. オイラーの方法による動摩擦係数測定実験

4.1 実験内容

オイラーの方法による動摩擦係数測定実験というのはよく知られているように、斜面上に物体を置き、徐々に勾配を大きくしていき、ついに物体がすべり出す現象を測定して摩擦係数を求めようとする実験である。斜面上の物体の静摩擦係数 μ_s および物体が斜面上をすべるとき動摩擦係数 μ_d は次の式で与えられる¹³⁾。

$$\mu_s = \tan \theta_s \tag{2}$$

$$\mu_d = \tan \theta_s - \frac{2S}{gt_s^2 \cos \theta_s} \tag{3}$$

ここに、 θ_s : 物体がすべりはじめるときの斜面の傾斜角

S : 物体のすべりおちる距離(m)

t_s : 物体が距離 S をすべりおちるに要した時間(s)

g : 重力加速度(9.8m/s²)

この研究でのオイラーの方法による動摩擦係数測定の実験装置は図-3に示すようなものであり、すべり台を油圧ジャッキで押し上げて、剛体模型を斜面上ですべらせた。すべり台は長さ180cm、幅38cmである。実験は2

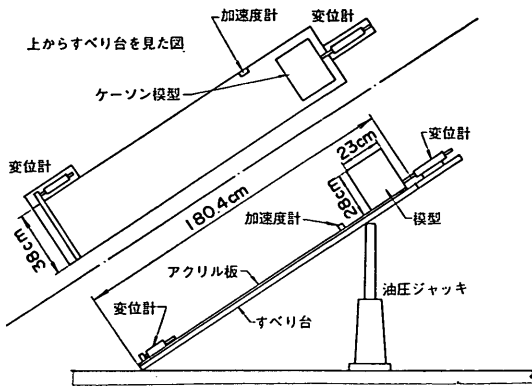


図-3 オイラーの方法による摩擦係数測定実験

ケースを行った。第1ケースは剛体模型B2をアクリル板上に置いたもの、第2ケースは剛体模型B1をモルタル板上に置いたものである。アクリル板(厚さ3mm)およびモルタル板(厚さ20mm)はすべり台上に固着した。

すべり台の傾斜角はすべり台上に固定した加速度計で重力加速度のすべり方向の成分を測定し、これより求めた。具体的にはすべり方向の重力加速度 \bar{g} 、重力加速度を g とすると、次式により傾斜角 θ_s を求めた。

$$\theta_s = \sin^{-1}\left(\frac{\bar{g}}{g}\right) \quad (4)$$

剛体模型が所定の距離をすべり落ちるに要した時間は

次のようにして測定した。滑動開始の瞬間は、図-3に示したすべり台上端の変位計の記録より求めた。所定の距離を剛体模型がすべり終わった瞬間は、図-3に示したすべり台下端にある横棒への剛体模型の接触を変位計で検出することにより求めた。剛体模型の滑動開始と所定の距離をすべり終わった瞬間を示す変位計の記録と、この記録紙の送り速度とから剛体模型が所定の距離をすべり落ちるに要した時間を求めた。

油圧ジャッキを徐々に上にあげていくと、すべり台は油圧ジャッキとの接点ですべりながら上昇していく。このとき、油圧ジャッキを押上げる瞬間にだけすべり台上に振動が発生した。油圧ジャッキとすべり台との間の摩擦をできるだけ少なくしたが、それでもすべり台上の加速度計では最大で約10Galの加速度が記録された。実験後、記録をみた限りでは、剛体模型はこの約10Galの加速度を示す振動中には滑動を開始していなかった。このすべり台と油圧ジャッキの摩擦による振動が測定結果に与える影響は少ないものと考えられる。

4.2 実験結果

すべり台の傾斜角、すべり落ちた距離およびこれに要した時間より、4.1で示した(2)、(3)式から摩擦係数を求めた。結果を表-3,4に示す。表-3はアクリル板上の剛体模型B2、表-4はモルタル板上の剛体模型B1の測定結果である。モルタル板の場合はモルタル板の表面が剛体模型のすべりにより変化するかもしれないことを考慮し

表-3 オイラーの方法による摩擦係数測定結果 (その1)
剛体模型B2, アクリル板上, すべり距離150cm

No.	すべり台と水平面の角度 (度)	かかった時間 (s)	速度 (m/s)	静摩擦係数	動摩擦係数
1	29.0	1.57	0.96	0.55	0.41
2	29.9	1.43	1.05	0.58	0.40
3	29.6	1.62	0.93	0.57	0.44
4	30.1	1.31	1.15	0.58	0.37
5	29.6	1.48	1.01	0.57	0.41
6	27.8	2.20	0.68	0.53	0.46
7	33.1	1.17	1.28	0.65	0.39
8	29.8	1.48	1.01	0.57	0.41
9	29.9	1.51	0.99	0.58	0.42
10	29.9	1.47	1.02	0.58	0.41
11	29.8	1.49	1.01	0.57	0.41
12	30.9	1.35	1.11	0.60	0.40
13	31.0	1.44	1.04	0.60	0.43
				平均 0.58	平均 0.41
				標準偏差 0.03	標準偏差 0.02

表-4 オイラーの方法による摩擦係数測定結果(その2)
剛体模型 B 1, モルタル板上, すべり距離 146cm

No.	すべり台と水平面の角度 (度)	かかった時間 (s)	速度 (m/s)	静摩擦係数	動摩擦係数
1	36.9	1.50	1.95	0.75	0.58
2	32.2	1.71	1.71	0.63	0.51
3	32.8	2.01	1.45	0.65	0.56
4	35.6	1.47	1.99	0.71	0.54
5	29.8	1.84	1.59	0.57	0.47
6	32.9	1.42	2.06	0.66	0.47
				平均 0.66	平均 0.52
				標準偏差 0.06	標準偏差 0.04

て、実験回数を少なくした。

表-3の結果によれば、オイラーの方法による静摩擦係数の平均値は3.の静摩擦係数の測定実験結果の値よりやや小さい。また、表-4に示すように、モルタル板上の剛体模型の静摩擦係数のほうがアクリル板上のそれより大きくなっている。

表-3, 4 に示すように動摩擦係数は静摩擦係数より小さい値となっている。両者の比はアクリル板上の剛体模型の場合で70%, モルタル板上の剛体模型の場合で80%となっている。動摩擦係数と静摩擦係数の差は、アクリル板と剛体模型の場合より、モルタル板の場合のほうが小さくなっている。

表-5 地震波形振動試験装置の性能

項目	性能
振動方向	水平1方向
最大加振力 (tf·G)	12
最大可動部重量 (tf)	24
振動箱内のり (m)	長さ5×幅1.5×高さ1.5
最大変位 (cm)	±5
最大速度 (cm/s)	15
最大加速度 (全載荷時, G)	0.5
振動波形	任意波形
振動数範囲 (Hz)	0.2~50

5. 水中の剛体模型の地震時滑動実験

5.1 振動台

実験に使用した振動台は、運輸省港湾技術研究所所有の地震波形振動試験装置である。この振動台の駆動方式は動電型駆動方式と呼ばれるものである。電気油圧式と比較して同一の駆動力を得るには建設費がかかる方式で

あるが、広い振動数範囲でひずみの少ない精度の高い波形を発生させることができる。振動台は油圧により支持されている。振動台の詳しい性能を表-5に示す。

5.2 模型および測定器

図-4,5に今回実施した実験の剛体模型および測定器の配置を示す。使用した剛体模型は2.で示したAおよびB

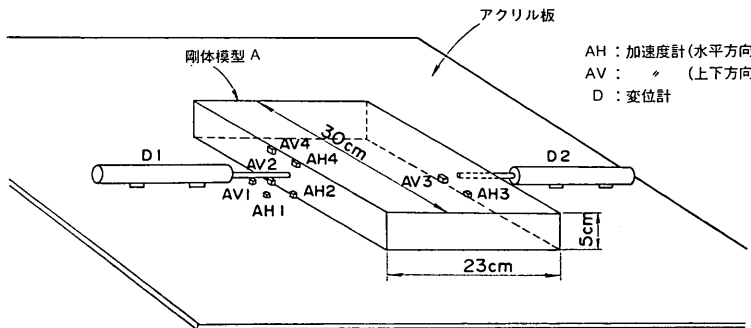


図-4 測定器の配置図 (剛体模型A)

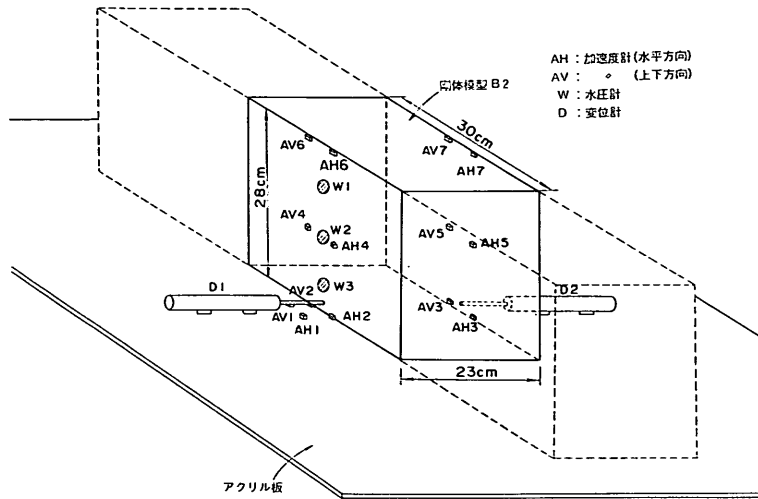


図-5 測定器の配置図 (剛体模型 B 2)

2 模型である。剛体模型は振動台上に固着したアクリル板あるいはモルタル板上に設置して実験を行った。

加速度計としては防水型のひずみゲージ式加速度変換器 (定格容量±10G, 応答が一様な振動数範囲 0~150 Hz, 重量 40gf) を用いた。図-3, 4 に示す加速度計はすべてこの加速度計である。変位計は防水型の差動トランス式変位変換器 (定格容量 ±10mm) を用いた。変位計は接着剤で振動台上に固定した。水圧計はひずみゲージ式圧力変換器 (定格容量 0.5kgf/cm², 重量 230gf) を用いた。水圧計は剛体模型内に埋め込み、水圧計の受圧面が剛体模型の側面と同一レベルとなるようにした。

加速度計, 水圧計, 変位計からの信号は増幅器を通して, 電磁オシログラフに記録した。

5.3 加振条件

表-6に実験の種類と加振条件を示す。表に示すように入力波形は正弦波と地震波である。表の正弦波10波加振とは設定した振動数で加速度振幅を一定にして10波加振する場合を示す。正弦波10波加振では共振実験, 滑動実験を行っているが, それぞれの実験で設定する振動数, 振幅値が異なる。共振実験は模型の応答特性を検討するための実験で, 振動数を変化させながら正弦波10波加振を繰り返し行い, 模型の応答加速度を測定するものである。正弦波の振動数は 5 Hz から 50 Hz まで 1 Hz きざみで変化させた。各加振での振幅値は一定値となるようにした。滑動実験は剛体模型の滑動挙動を測定する実験であり, 正弦波10波加振の振動数は 5, 7, 10, 20, 30 Hz から選択した。各加振での振幅値は, 剛体模型が滑動す

表-6 加振条件

実験の種類	加振条件
共振実験	正弦波10波 (5~50Hz, 1Hz きざみ) 各振動数で振幅一定
滑動実験	正弦波 10波 (5, 7, 10, 20, 30Hz から選択) 地震波

るような値を設定した。

滑動実験で用いた地震波形としては, 1978年宮城県沖地震の際に大船渡港の岩盤上で得られた記録 (S-1210, E-W成分)¹⁴⁾ を用いた。時間軸の調整は行わなかったが, 最大加速度は剛体模型が滑動するような値を設定した。

5.4 実験内容

表-7に実験内容の一覧表を示す。既に述べたように, 実験は大きくわけると共振実験と滑動実験である。共振実験は剛体模型 B 2 を用いて剛体模型とアクリル板の接触面の状態が乾燥の場合 (水がない場合) と水深 25cm の場合について行った。滑動実験は剛体模型 A と B 2 について実施している。剛体模型 B 2 の場合はアクリル板上に設置して, 水がない場合と水深 25cm の場合について実験している。剛体模型 A はアクリル板上に設置した実験を 2 ケース, モルタル板上に設置した実験を 1 ケース実施した。剛体模型 A では水中での実験は実施していない。

表-7 実験内容の一覧表

実験の種類	剛体模型	基礎	接触面の状態または水深	CASE	No.	入力波形		
						波形の種類	振幅(Gal)	振動数 (Hz)
共振実験	B 2	アクリル板	乾燥	3	39	正弦波10波	50	5~50
				4	1	"	"	"
					2	"	100	"
滑動実験	A	アクリル板	乾燥	1	5~9	正弦波10波	230~720	10
					10~13	"	390~690	20
					14~15	"	640	30
					17~22	地震波	350~700	—
				5	7,8	正弦波10波	700前後	7
	1~4	"	"	10				
	5~6	"	"	20				
	B 2	アクリル板	乾燥	4	4~9	正弦波10波	700前後	7
					1~3	"	"	10
					10~12	"	"	20
3					33~35	正弦波10波	600前後	5
					36, 37	"	約 550	10
25cm	4	3~10	正弦波10波	150前後	5			
		11~12	"	"	10			
		13~17	地震波	"	—			

6. 水中の剛体模型の地震時滑動実験結果

6.1 振動中の剛体模型の滑動

図-6~10に剛体模型Aの地震時滑動実験の測定結果の5例を示す。図-6~9は剛体模型Aをアクリル板上に設置した場合であり、図-10はモルタル板上の場合である。図-6は10Hzの正弦波10波加振実験結果、図-7は20Hzの正弦波10波加振実験結果、図-8は地震波加振実験結果、図-9は7Hzの正弦波10波加振実験結果である。図-10は10Hzの正弦波10波加振実験結果である。各測定位置の水平加速度、滑動変位、上下加速度の順に示してある。

図の振動台加速度の波形に示すように第1半波の振幅は後に続く波より小さくなっている。これは振動台の特性によるためであり、振動台の制御部にはデータレコーダから正確な正弦波が10波入力されている。剛体模型の各位置(AH 2~4)の水平加速度はほぼ同じ波形となっている。入力加速度が増大するとある瞬間に剛体模型は滑動し振動台との相対変位は急増する。その後、入力

加速度は減少するため剛体模型は滑動後のある相対変位で一定値を保ち、次に方向がかわった入力加速度が増大するとある瞬間に剛体模型は先ほどと逆の方向に滑動する。そのため、相対変位は急減し、もとの位置にもどろうとする。剛体模型はこのように滑動するため、滑動変位の時刻歴は図に示すように台形となっている。正弦波10波加振時間全体で見ると、滑動変位は一方方向にずれたり、一方方向にずれた後その逆方向にずれたり、ほぼ滑動前の位置を原点として両方向に変位するというような時刻歴を示す。滑動変位が一方方向にずれていく場合について、その滑動変位と入力最大加速度の関係をみたのが図-11である。図に示すようにある入力最大加速度で剛体模型の滑動変位が発生する。この滑動変位は入力最大加速度の増加に比して急激に増大するのがわかる。

次に、剛体模型の加速度波形をみてみると、滑動変位が最初に急増する直前の剛体模型の加速度は、その時点で振幅が非常に短い時間で減少し、滑動中はほぼ一定値を保っていることがわかる。このように剛体模型の加速度が減少するのは4.で示したように動摩擦係数が静摩擦

水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究

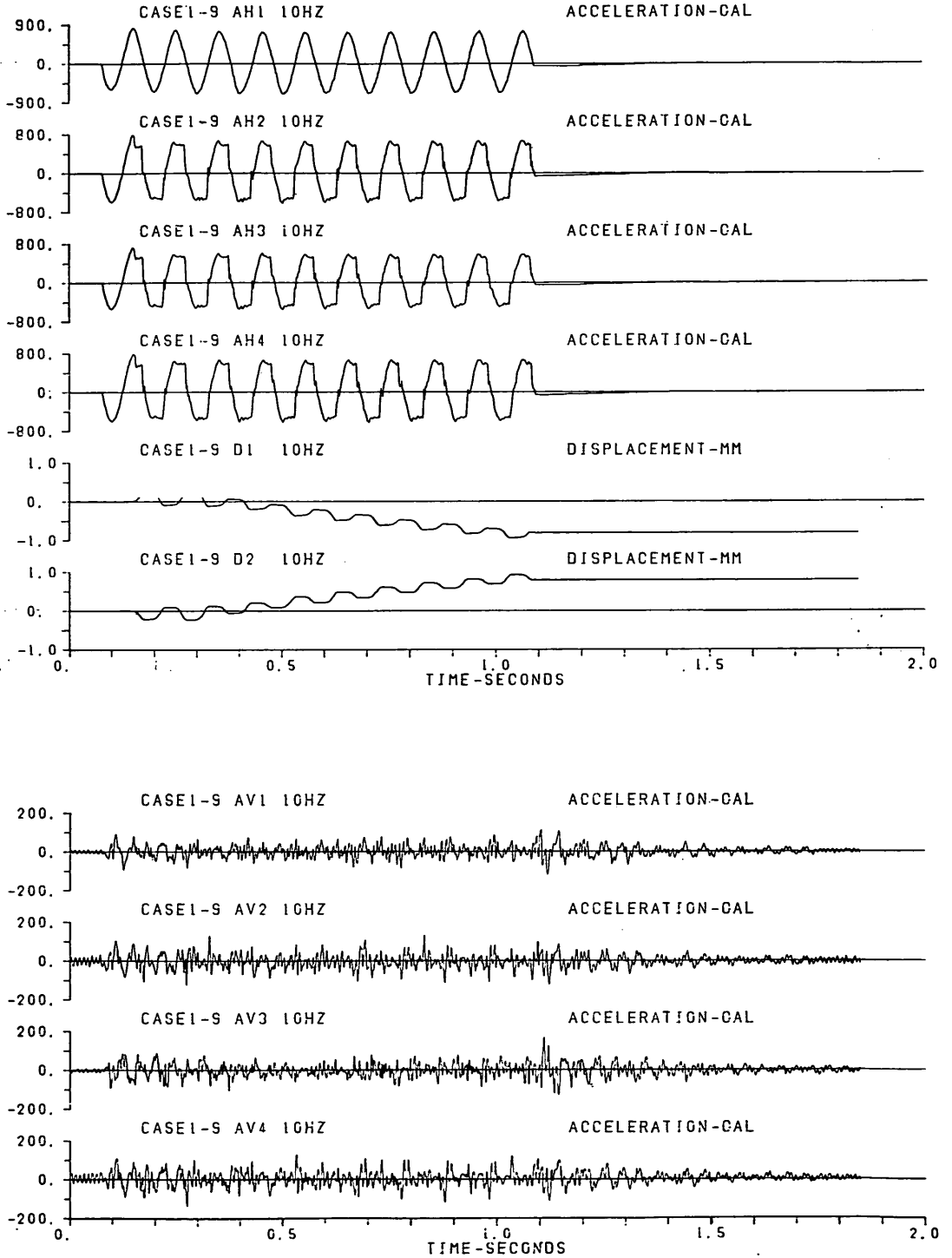


図-6 10Hz 正弦波 10 波加振実験 (剛体模型 A)

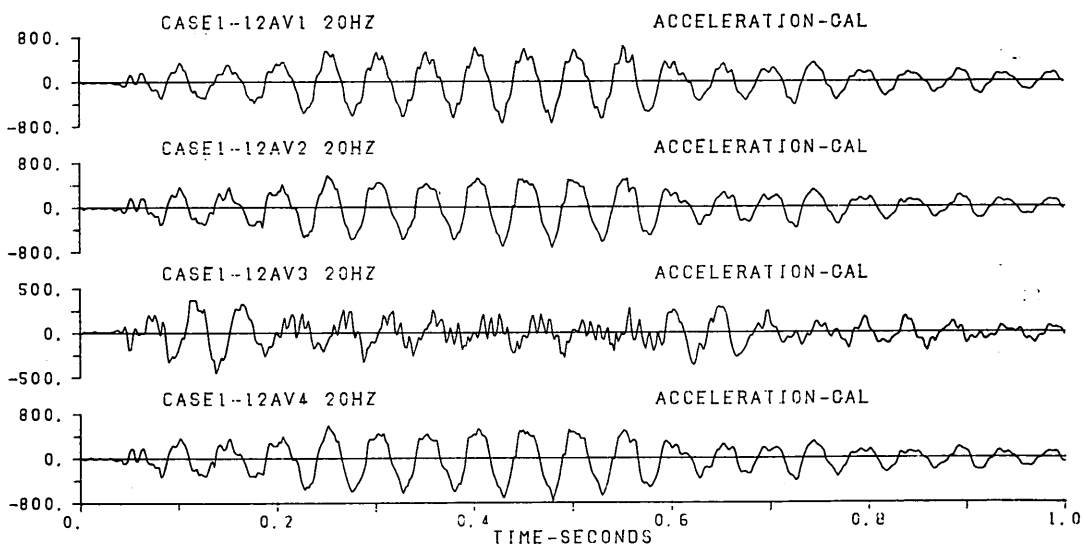
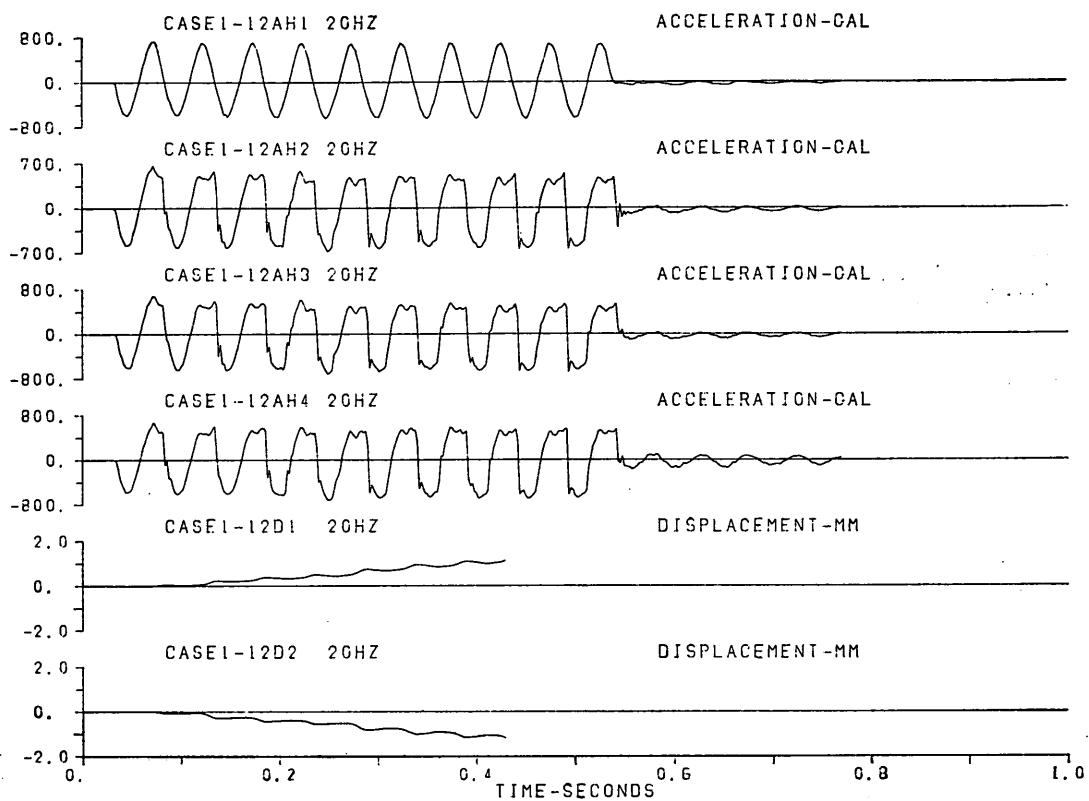


図-7 20Hz 正弦波 10 波加振実験 (剛体模型A)

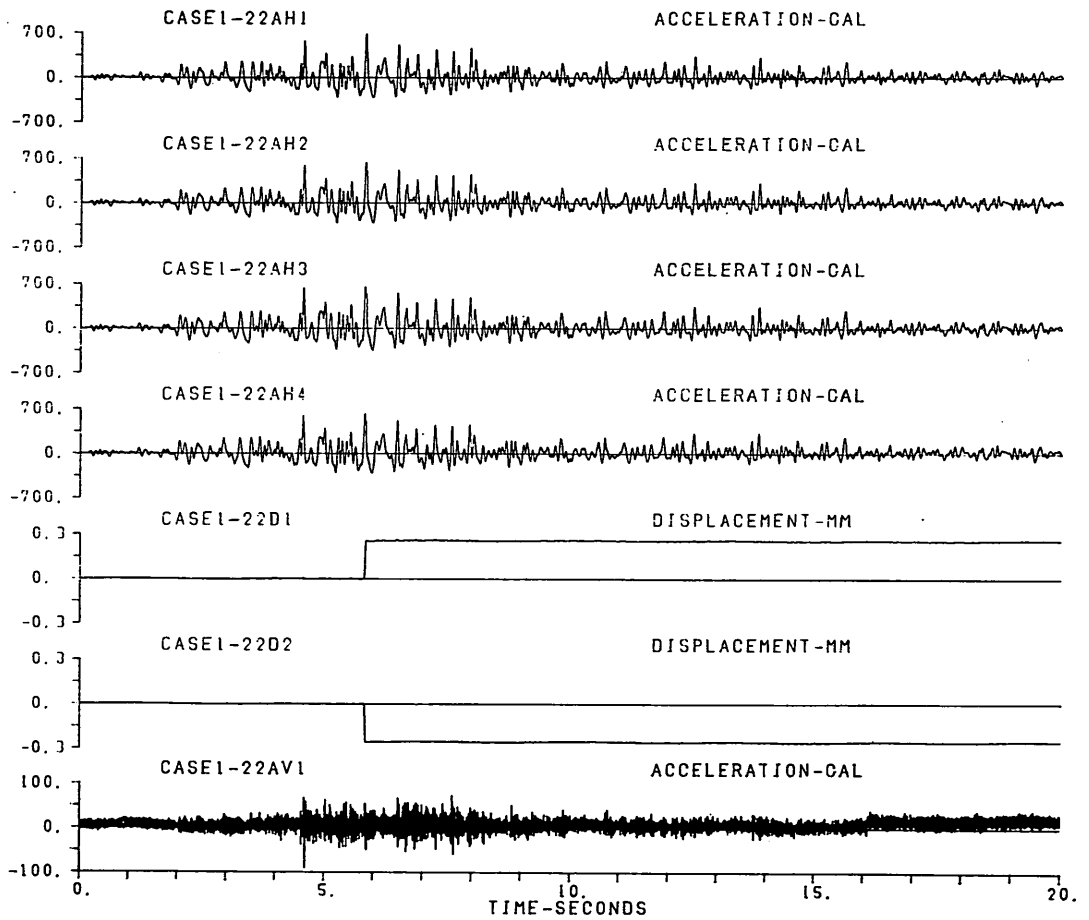


図-8 地震波加振実験 (剛体模型A)

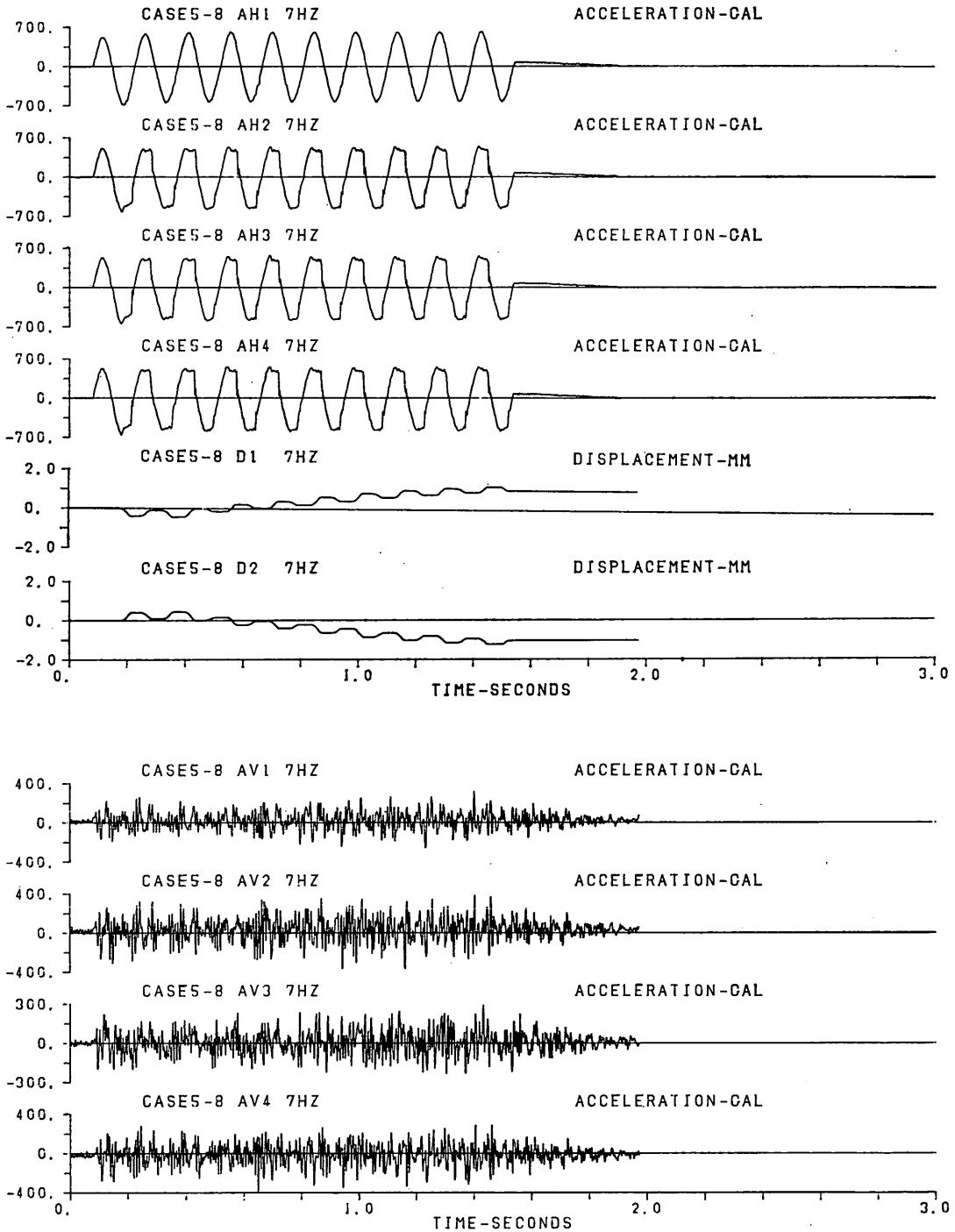


図-9 7Hz 正弦波10波加振実験（剛体模型A, アクリル板上）

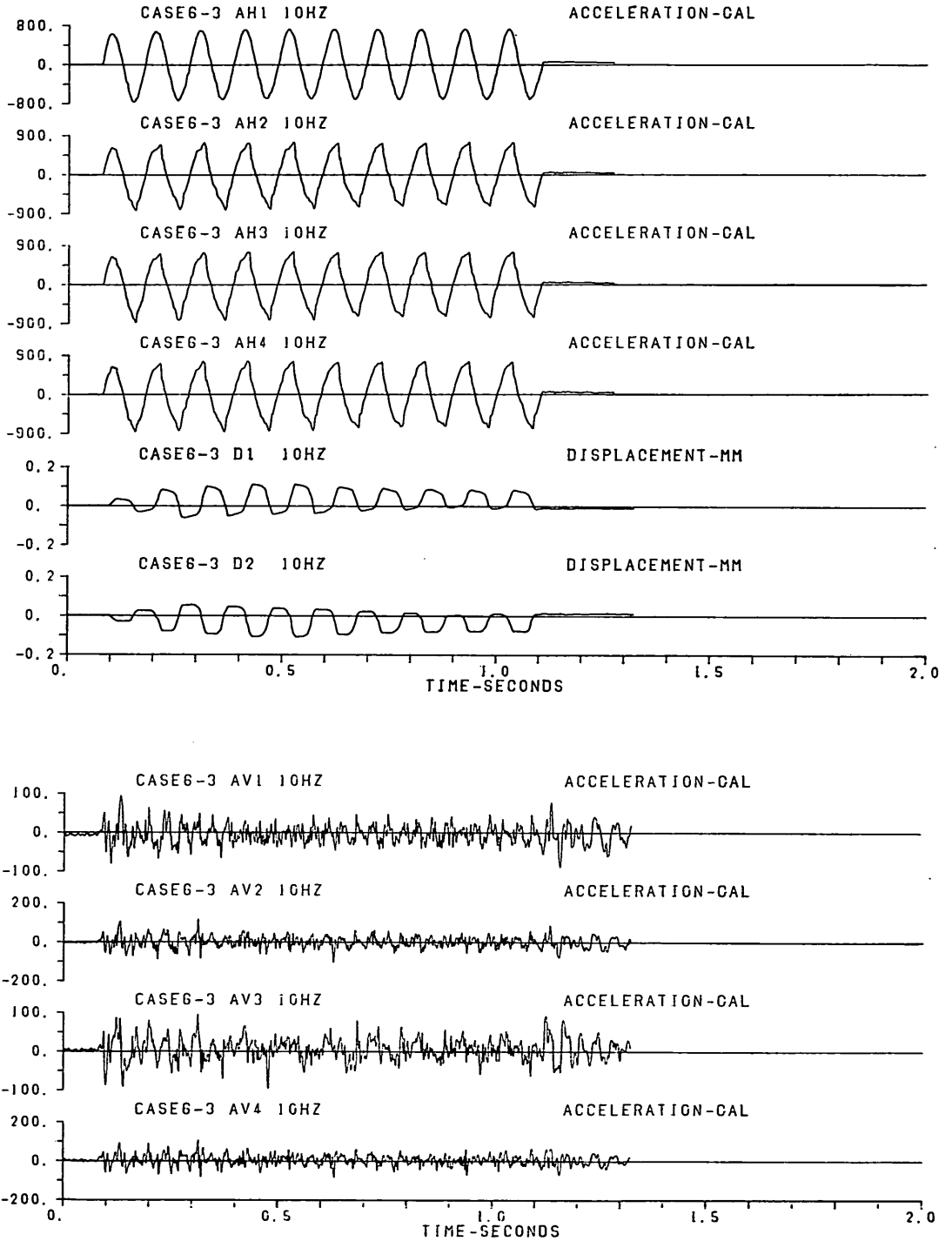


図-10 10Hz 正弦波10波加振実験 (剛体模型A, アクリル板上)

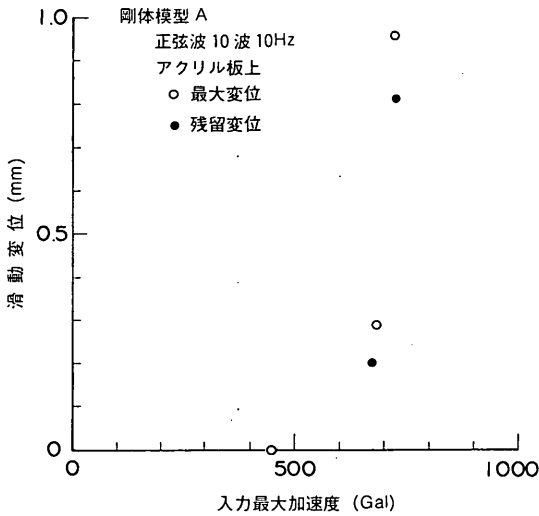


図-11 入力最大加速度と滑動変位

係数より小さいためである。詳しくは後で検討する。上下加速度は図に示すように100Hz 前後の高い振動数成分がみられる。入力正弦波の振動数が大きくなると上下加速度も大きくなる傾向がみられる。第1回めの滑動についての加速度波形は以上のとおりであるが、第2回め以降の滑動の場合の加速度波形は第1回めのそれと異なる。この2回め以降の滑動では剛体模型が複雑な挙動を示すことが考えられるのでさらに詳細に検討する必要がある。これについては将来の課題とし、ここでは第1回めの滑動について検討することとした。

変位計を剛体模型の両方に取り付けられている影響をみるために、変位計を取り外した地震時滑動実験も実施した。このときの剛体模型の加速度波形は変位計を取り付けた場合とほとんど同じであり、変位計を取り付けた影響は非常に小さいと考えられる。

図-12,13には剛体模型 B 2 の地震時滑動実験の測定結果の2例を示す。両方とも5Hz の正弦波10波加振実験の結果であり、図-12は水のない場合、図-13は水深25cm の場合である。図-13には剛体模型 B 2 に作用する動水圧の波形が示してある。この波形は剛体模型の水平加速度とはほぼ同じような波形を示している。また、上下加速度は水深25cm の場合には水がない場合に比較して小さくなっている。

6.2 剛体模型の振動特性

(1) 振動台および剛体模型各位置の水平加速度

図-14,15には剛体模型の両側の水平加速度を同一高さ

について、軌跡の形で比較したものである。図-14はモルタル板上の剛体模型 A、図-15はアクリル板上の剛体模型 B 2 で水深が25cm の場合について示してある。第1波と第2波と区別している。図に示すように剛体模型の両側の水平加速度はほぼ同じである。ただ、図-15に示すように、第2波は剛体模型 B 2 が滑動しており複雑な挙動を示している。

次に、図-16~18には各位置の最大加速度を示したものである。正弦波10波加振では第1半波、地震波加振では全加振時間中の最大値である。図-16はアクリル板上の剛体模型 A、図-17はアクリル板上の剛体模型 B 2 で水がない場合、図-18は水深が25cm の場合である。図では剛体模型の同一側壁の各位置の最大加速度は各種の線で結んであり、入力最大加速度は横軸の下に示してある。剛体模型 A の場合には高さが低いので、剛体模型の天端と下端はほぼ同じ最大加速度である。また、図-18に示すように剛体模型 B 2 で水深が25cm の場合には剛体模型の天端と下端の最大加速度はほぼ等しくなっている。水がない場合の剛体模型 B 2 では剛体模型天端の最大加速度は下端のそれよりやや大きい値を示している。正弦波10波加振では5Hz よりも10Hz の場合のほうが天端と下端の最大加速度の差が大きくなっている。この剛体模型 B 2 の応答特性については後述する。

(2) 振動台および剛体模型各位置の上下加速度

図-6~10,12,13に示したように剛体模型の上下加速度が測定されており、その値が大きい場合もあるのでここでは上下動成分について検討する。

振動台が無載荷の状態での加振でも振動台の上下動成分があることが推察されたので、測定を行った。結果を表-8に示す。5Hz の正弦波を連続に加振する場合で水平最大加速度が480Gal の場合には振動台の上下最大加速度は7Galであった。5Hz の正弦波10波加振では、水平最大加速度が309Galで振動台の上下最大加速度は第1波のところで12Gal、そのあとの定常状態のところで6Galであった。これより振動台の上下動成分は水平最大加速度の1~4%以下にとどまっていることがわかった。

表-8 正弦波加振時の無載荷振動台の上下動成分

入力波形	水平最大台 加速度(Gal)	上下最大台 加速度(Gal)	上下水平最大 加速度の比 (%)
5Hz 正弦波 の連続加振	480	7	1.4
5Hz 正弦波 10波加振	309	12(6)	3.9(1.8)

()内の上下最大台加速度は定常状態の値

水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究

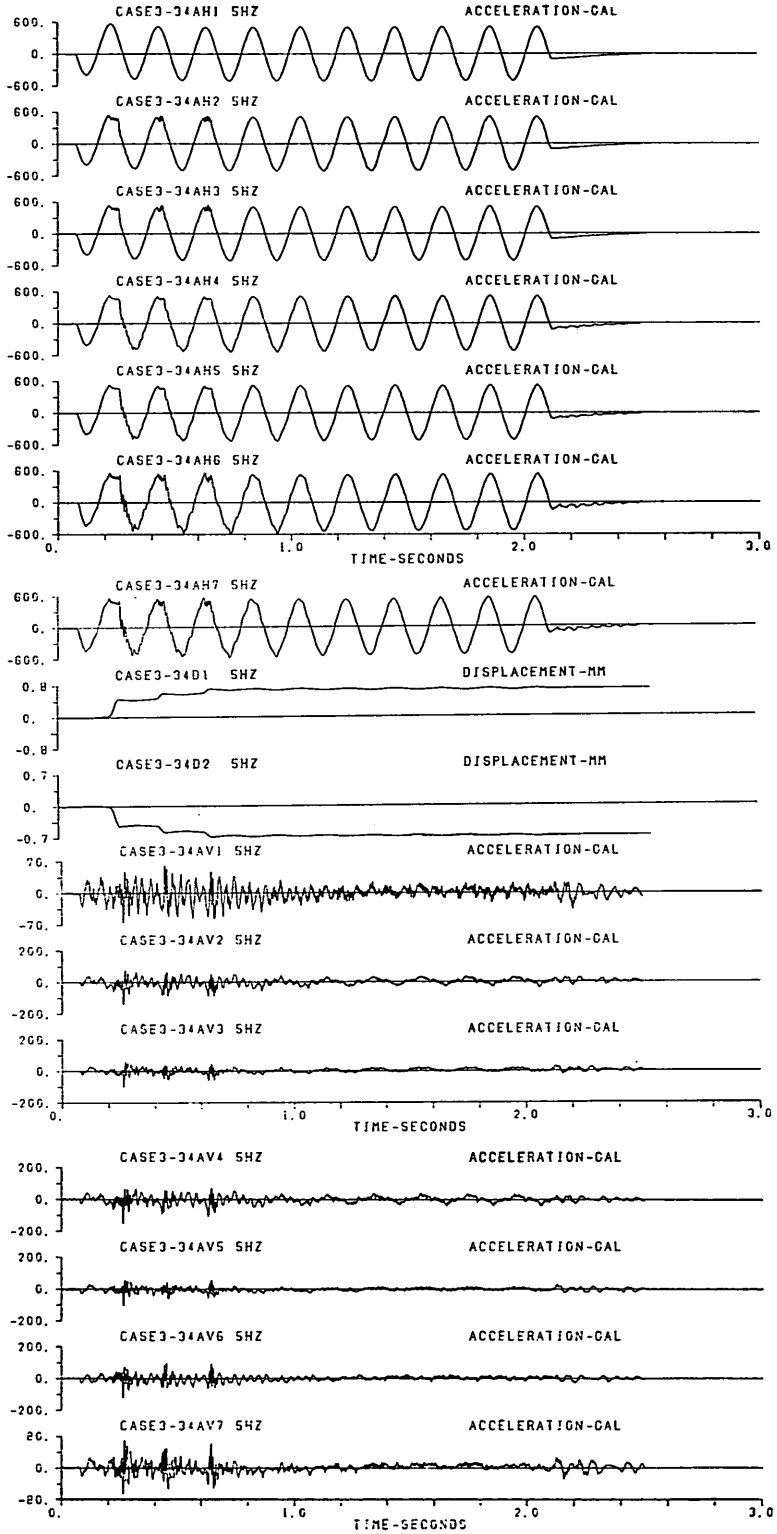


図-12 5 Hz 正弦波10波加振実験 (剛体模型 B 2, 水なし)

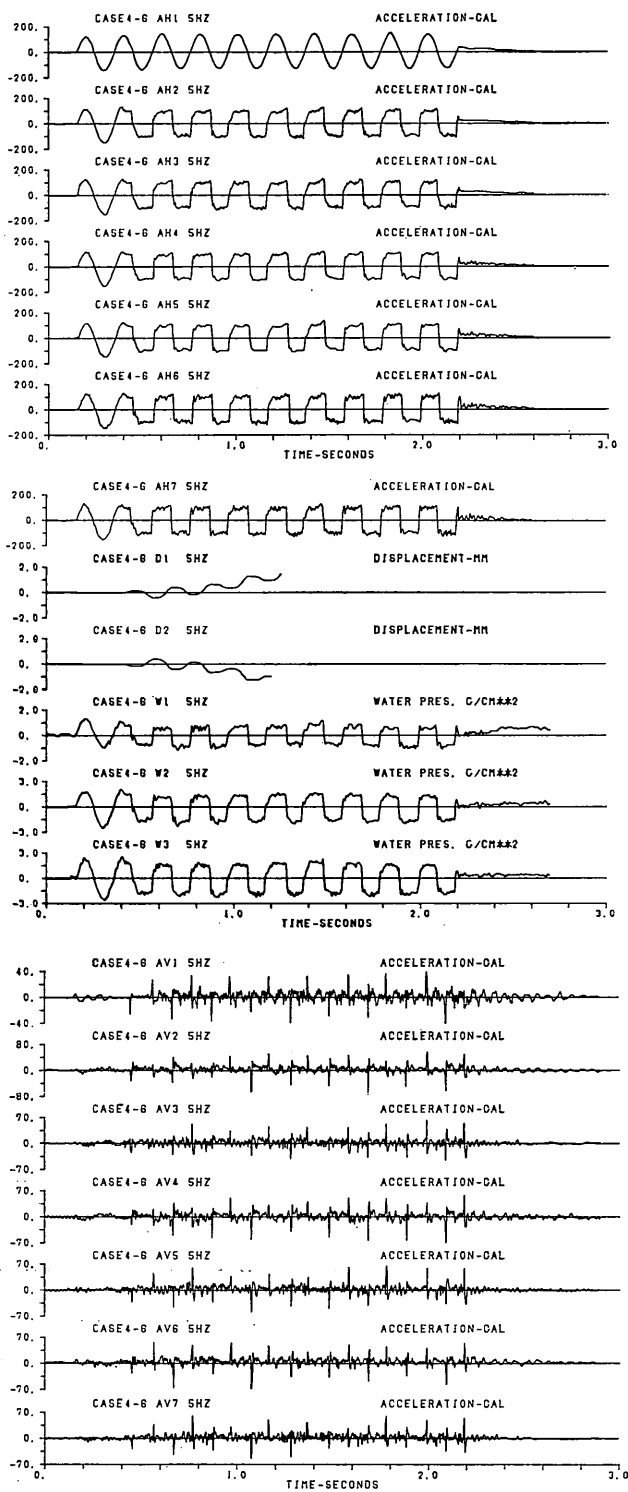


図-13 5 Hz 正弦波10波加振実験 (剛体模型 B 2, 水深25cm)

剛体模型A, モルタル板上

第1波

第2波

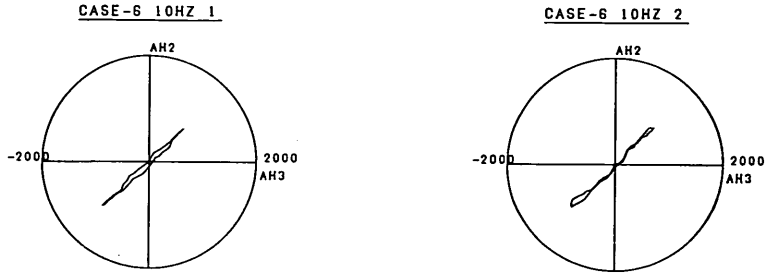


図-14 剛体模型Aの各位置の水平加速度の比較

剛体模型B2, アクリル板上, 水深25cm

第1波

第2波

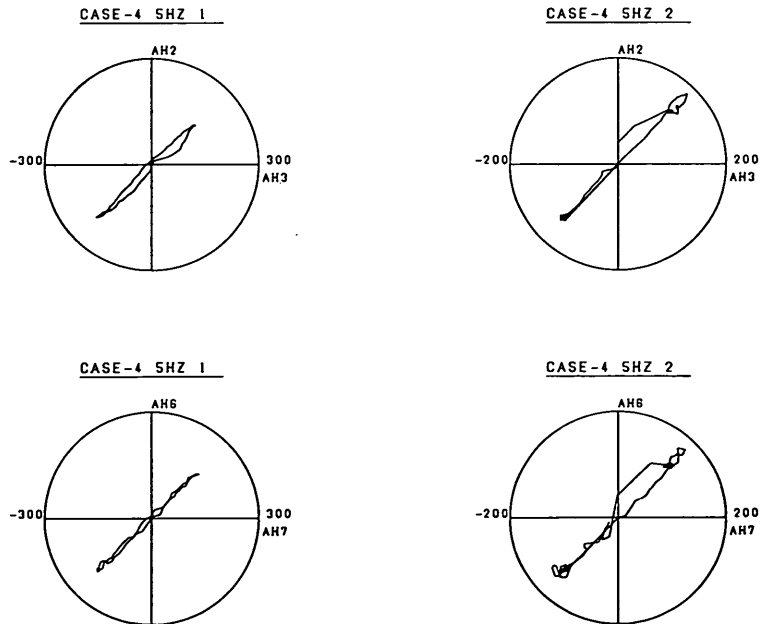


図-15 剛体模型B2の各位置の水平加速度の比較

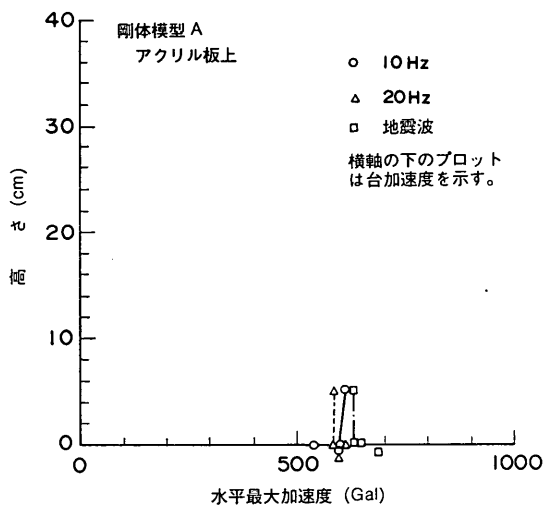


図-16 剛体模型 A の各位置の水平最大加速度

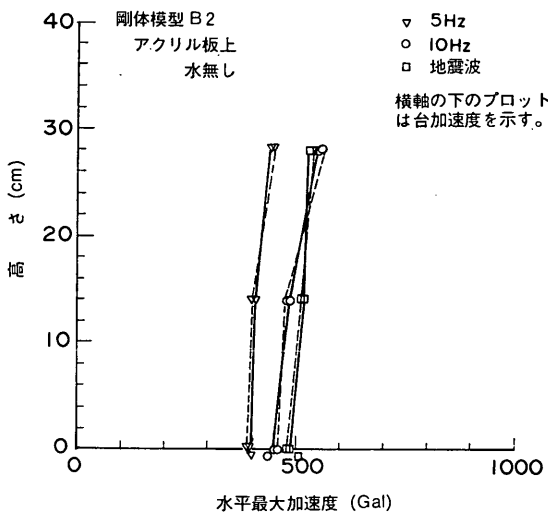


図-17 剛体模型 B 2 の各位置の水平最大加速度

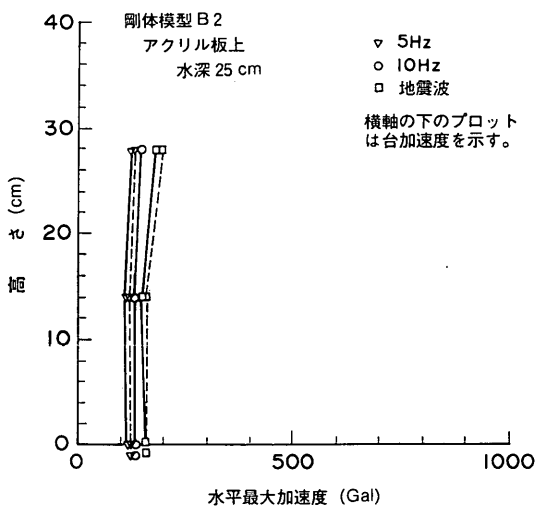


図-18 剛体模型 B 2 の各位置の水平最大加速度
(水深 25cm)

剛体模型A, アクリル板上

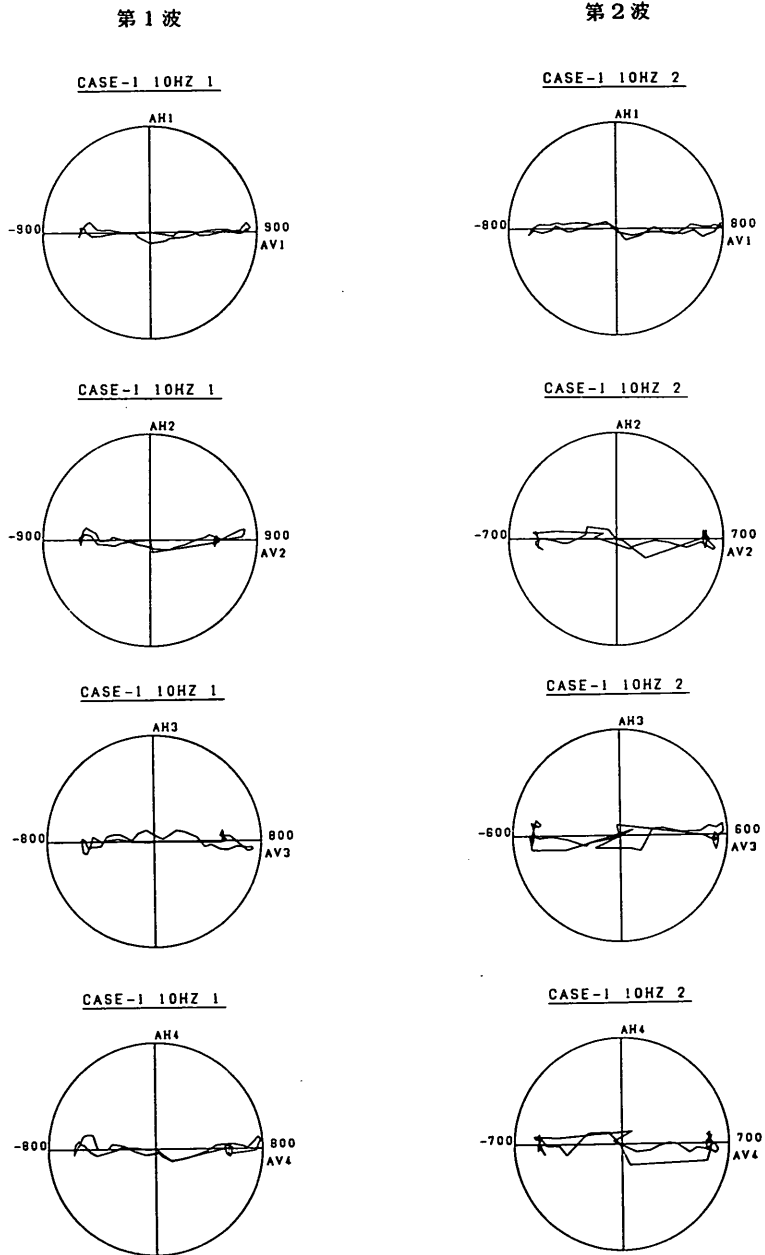


図-19 剛体模型Aの水平、上下加速度の軌跡

剛体模型B2, アクリル板上

第1波

第2波

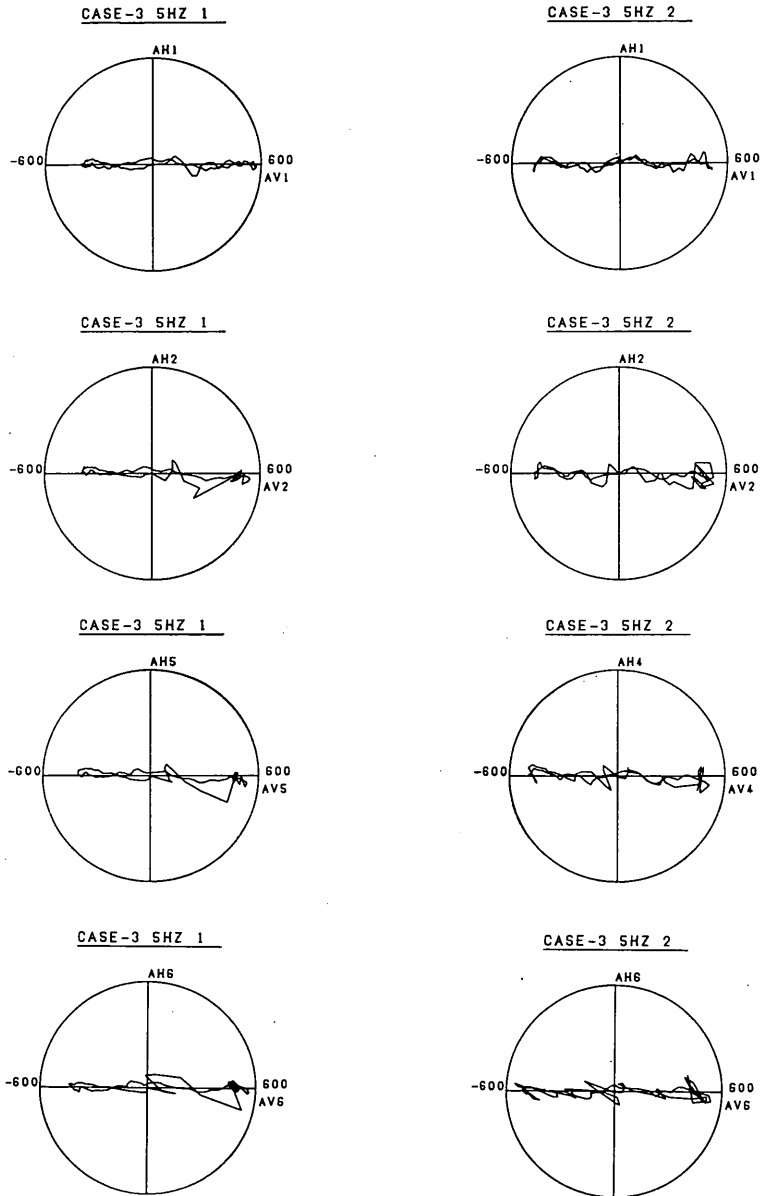


図-20 剛体模型B2の水平, 上下加速度の軌跡

図-19, 20には振動台および剛体模型各位置の水平, 上下加速度の軌跡を示す。図-19は剛体模型A, 図-20は剛体模型B2で水がない場合である。振動台および剛体模型が滑動する以前の状態では上下加速度は水平加速度に比較してかなり小さいことがわかる。ところが, 剛体模型が滑動するとかなり複雑な軌跡を示し, 上下加速度の値も滑動以前と比較して大きくなる。

次に, 滑動を開始する前の第1半波における上下最大加速度を各位置の高さ別に示したのが図-21~23である。

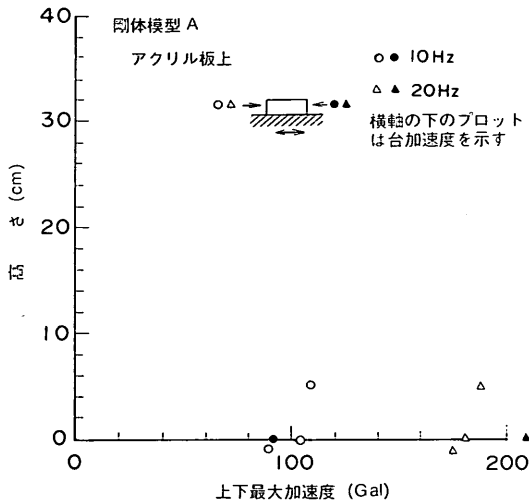


図-21 剛体模型Aの各位置の上下最大加速度

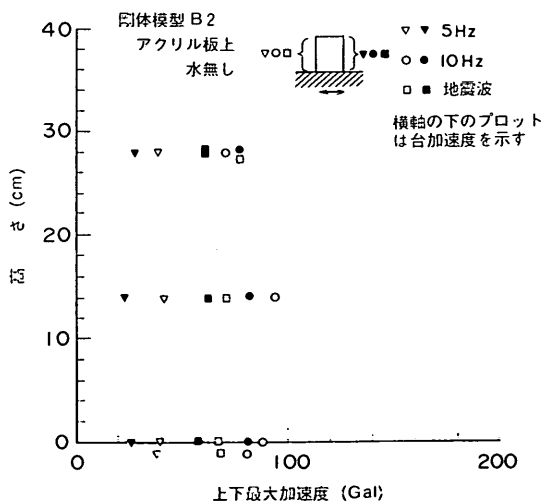


図-22 剛体模型B2の各位置の上下最大加速度

図-21は剛体模型Aで, 図-22は剛体模型B2で水がない場合, 図-23は水深が25cmの場合である。剛体模型の両側面に取り付けた加速度計の記録は区別して示してある。図-21によれば, 剛体模型Aの場合には10Hz正弦波10波加振で上下最大加速度は100Gal前後で, 20Hz正弦波10波加振では200Gal前後の値となっている。水がない場合の剛体模型B2の各位置の上下最大加速度は20~80Galであり, 10Hz正弦波10波加振を除けば, 剛体模型の天端と下端の上下最大加速度の差は小さい。水深が25cmの場合には図-23に示すように上下最大加速度は30Gal以下である。

(3) 剛体模型B2の共振曲線

図-24, 25に剛体模型B2について実施した共振実験の結果を示す。図-24は水がない場合, 図-25は水深が25cmの場合である。剛体模型の最大加速度と入力最大加速度の比を加速度応答比とし, 入力正弦波の振動数に対して示してある。図中実線は剛体模型の中間の高さ(AH4)の共振曲線, 点線は天端(AH6)の共振曲線である。水がない場合には, 21Hz, 31Hz, 48Hzにピークがある。水深25cmの場合には, ピークを示す振動数が下がっており, 18Hz, 29Hz, 40Hzとなっている。正弦波10波加振での滑動実験は剛体模型B2の場合には5Hzと10Hzについて実施しており, 共振曲線からわかるようにこれら振動数は共振振動数より小さく, 加速度応答比もほぼ1に近い値となっている。これは, 図-17, 18に示した水平加速度の高さ方向の分布とも一致してい

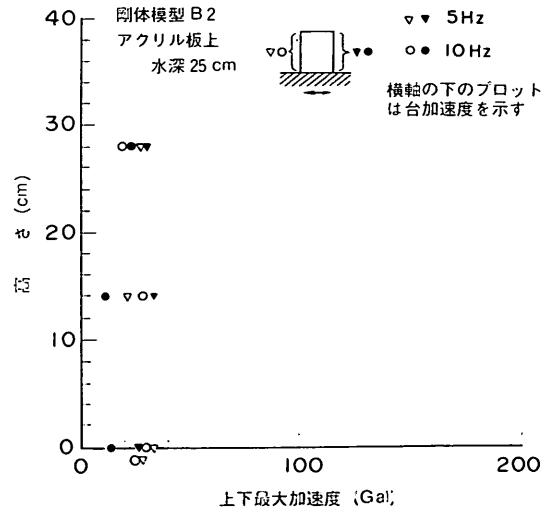
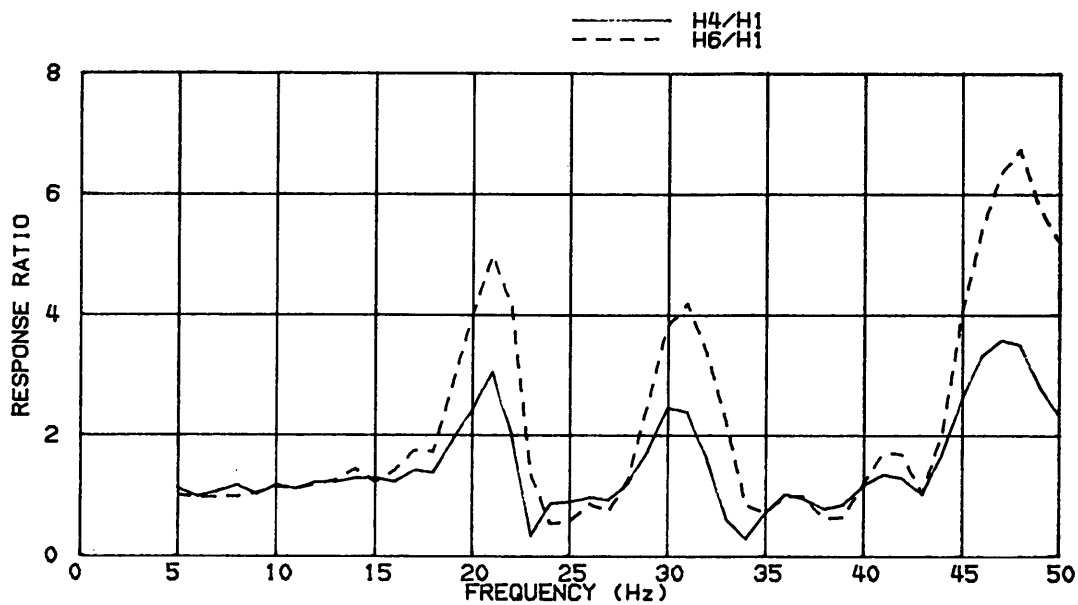
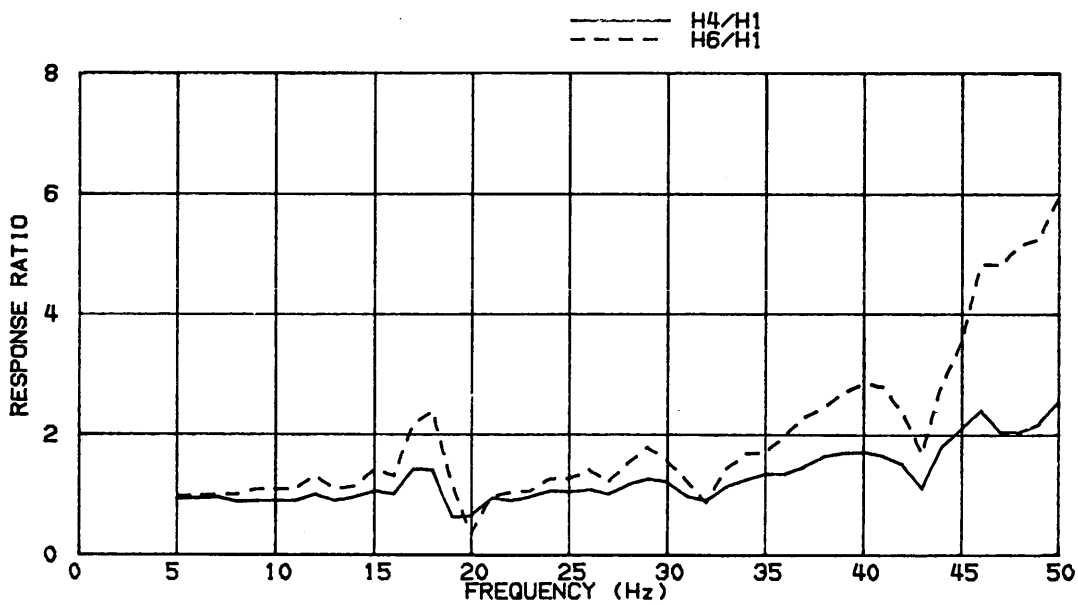


図-23 剛体模型B2の各位置の上下最大加速度 (水深25cm)



CASE-3 NO.39

図-24 共振曲線 (水なし)



CASE-4 NO.1

図-25 共振曲線 (水深25cm)

る。ここでの検討は剛体の地震時滑動現象を把握するというであり、ここで用いた入力波の振動数に対して、模型は剛体としての挙動を示していると考えられる。構造物の応答特性を考慮した地震時滑動現象の把握は今後の課題であり、ここでは検討しない。

6.3 剛体模型に作用する動水圧

剛体模型に作用する動水圧の波形は既に図-13に示した。剛体模型が滑動する前の波形の振幅の最大値を求め、そのときの剛体模型の最大加速度とともに示したのが、図-26である。図の左側に最大加速度を、右側に動水圧の深さ方向の分布を示してある。図中点線は中間の高さ(AH4)の最大加速度を重力加速度で除したものを震度として Westergaard の簡略公式で計算した値である。この計算値は測定値とはほぼ等しいのがわかる。

図-13の動水圧の波形は加速度波形と同様に滑動を開始すると減少し、滑動中はほぼ一定値を示す。そこで、滑動するこの正弦波半波のうちで、滑動を開始する直前の動水圧と滑動中の動水圧をみる。図-27には両者の動水圧の値の分布を示す。図-28は滑動前後の動水圧

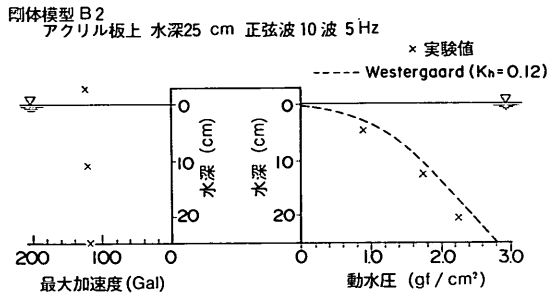


図-26 剛体模型に作用する動水圧

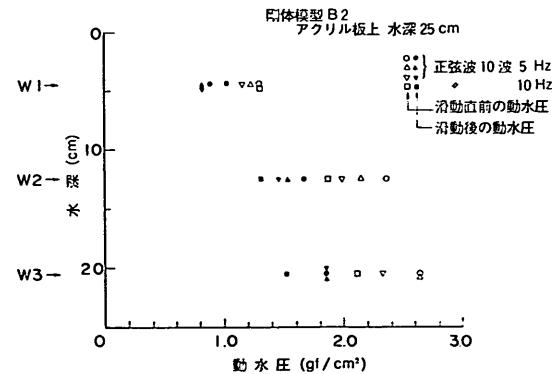


図-27 滑動前後の動水圧

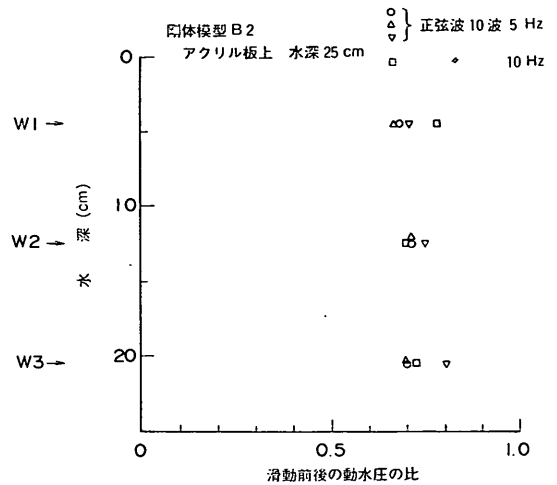


図-28 滑動前後の動水圧の比

の変化を比の形で示したものである。これによれば、減少の割合は高さ方向ではほぼ等しく、その割合は7~8割であることがわかる。

6.4 滑動実験から得られる摩擦係数

(1) 摩擦係数の一般的知見

4.において静摩擦係数、動摩擦係数について述べているが、この節で振動実験の結果について検討するまえに摩擦係数の一般的知見についてもう一度整理する。摩擦に関するクーロンの三法則とは以下に述べるようなものである。

- ①摩擦力は摩擦面に働く垂直力に比例し、見かけの接触面積の大小には関係しない。ここでいう見かけの接触面積とは外観上の接触面積をいう。
- ②摩擦力(動摩擦の場合)はすべり速度の大小には関係しない。
- ③静摩擦力は動摩擦力よりも大きい。

オイラーの方法による滑動実験のように斜面上の物体の場合は物体を滑動させようとする力が静摩擦係数により定まる摩擦力を越えたとき滑動を開始し、滑動中の摩擦抵抗は動摩擦係数より定まる。これを上下動がない場合の正弦波入力時の剛体の滑動の場合についてみると図-29のようになる。図中の上の正弦波が入力加速度、中段の波形が剛体の加速度、下の波形が剛体の滑動変位である。剛体は静摩擦力に相当する慣性力により滑動を開始し、滑動後は静摩擦係数より小さい動摩擦係数で、相対速度がゼロとなるまで滑動する。なお、摩擦係数は相対速度の増加とともに静摩擦係数から動摩擦係数に連続

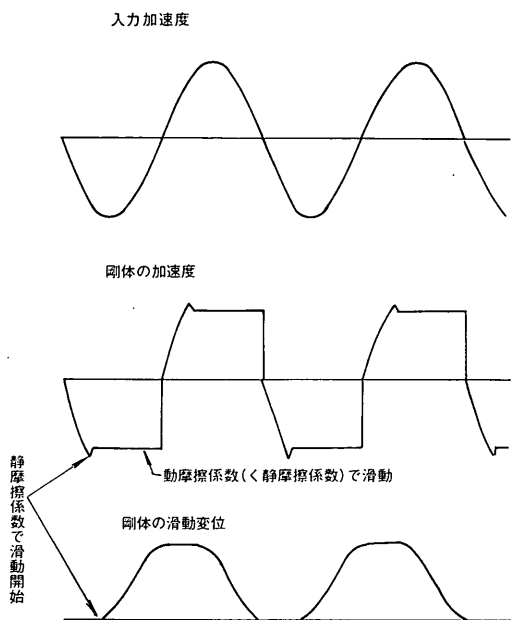


図-29 上下動がない場合の正弦波入力時の剛体の滑動

的に変化し、ある値に漸近するといわれている¹³⁾が、ここでは単純化して、静摩擦係数と動摩擦係数は不連続に変化すると考えている。図-6に示したように剛体模型の加速度は、滑動を開始するとほぼ瞬間的に減少し、滑動中はほぼ一定値をとっており、ここで述べた考え方で剛体の地震時の滑動変位量がほぼ推定できると考えられる。詳しくは以下に検討する。

(2) 地震時滑動実験より求めた動摩擦係数

まず、剛体の滑動現象を単純に示していると考えられる剛体模型Aの実験結果について検討する。図-9に示すように滑動変位が生じる時刻において、剛体模型の加速度はピークに達している。この時刻を滑動開始と考え、剛体模型の水平、上下加速度より静摩擦係数を求めた。剛体模型の水平加速度はピークに達したあと滑動開始後は瞬間的に減少し、ほぼ一定値へと変化している。前述したように、動摩擦係数は静摩擦係数から不連続に変化し、滑動中は一定値をとるとしているの、滑動中の剛体模型の水平加速度を平均し、これから摩擦係数を求め、これを平均動摩擦係数とした。図-30に求めた静摩擦係数と平均動摩擦係数を示す。アクリル板上とモルタル板上での実験結果が示してある。図-30によれば、アクリル板上では動摩擦係数は静摩擦係数の約7割、モル

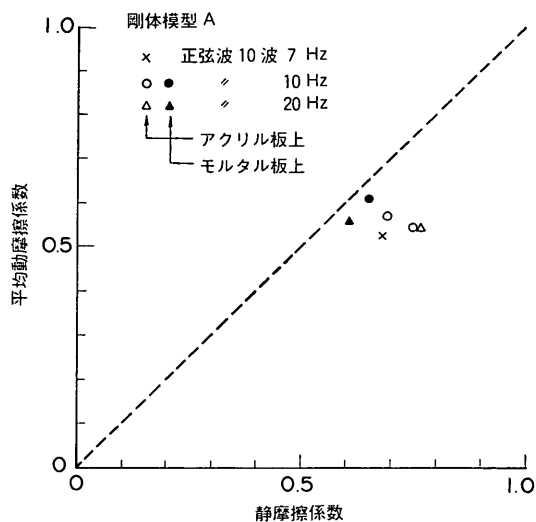


図-30 剛体模型Aの静摩擦係数と動摩擦係数

ル板上ではその割合は約9割となっている。

次に剛体模型B2の実験結果について検討する。剛体模型B2については水がない場合と水深25cmの場合について検討している。水中の場合の摩擦係数の計算では、実験より得られた動水圧の測定値から片側の壁面に作用する動水圧の合力を求め、その2倍に相当する付加質量を考慮した。また、剛体模型の加速度は高さ方向に少し変化するので測定値を平均して、摩擦係数の計算に用いた。滑動開始の考え方とそのときの静摩擦係数、動摩擦係数の求め方は剛体模型Aの場合と同様である。水中の剛体模型の動摩擦係数の計算では、滑動開始時より減少した動水圧を考慮している。

図-31は水がない状態と水深25cmの場合の静摩擦係数を入力最大加速度で区別して示す。水中の場合の静摩擦係数のほうが、水がない場合のそれよりやや小さい値となっている。これは、主に水圧計、加速度計(実験では振動数特性の配慮から100Gal程度の測定でも最大容量10Gの加速度計を使用している。)の計測上の問題等によるものと考えられる。図-31には引張試験結果(剛体模型B1)とオイラーの方法による実験結果の平均値も示してあるが、水がない場合のそれとほぼ等しいと考えられる。図-32には静摩擦係数と平均動摩擦係数を比較して示してある。図にはオイラーの方法による実験結果も示してある。動摩擦係数と静摩擦係数の比はオイラーの方法による実験結果のほうがやや小さくなっている。

以上の検討より、水中における剛体の地震の滑動につ

いて言えば、剛体の片面に作用する動水圧の2倍を重力加速度で割った付加質量を考慮して水中の剛体の地震時の挙動を検討すればよいことがわかった。

7. 剛体の地震時滑動変位量計算手法

7.1 剛体の地震時滑動変位量計算手法について

剛体の地震滑動変位量計算手法の概念はすでに1.において述べたように Newmark の方法、藤野、佐々木、伯

野の物体のすべりの研究成果に示されている。ここで検討する剛体の地震時滑動変位量計算手法も過去の研究で示されている概念と大きく異なるものではない。以下にはここで検討する剛体の地震時滑動変位量計算手法について述べる。

振動中の剛体の滑動は慣性力と摩擦力との関係で考えるので、加速度でまず議論される。これは、一般に強震計で得られる地震記録が加速度記録であることから考えても都合が良い。図-33 に示すような上下動がない場合の正弦波入力の場合の剛体の滑動について考える。いま剛体に乗っている基礎の入力加速度を $A(t)$ とする。慣性力が静摩擦力以下の場合には剛体は基礎と一体となって振動する。ここで静摩擦係数を μ_s 、重力の加速度を g とすると、基礎の入力加速度が $\mu_s \cdot g$ となると慣性力が静摩擦力と等しくなり、これより基礎の加速度が大きくなると剛体は滑動をはじめる。動摩擦係数を μ_d とすると、滑動を開始した剛体の加速度は $\mu_d \cdot g$ と考えられるで基

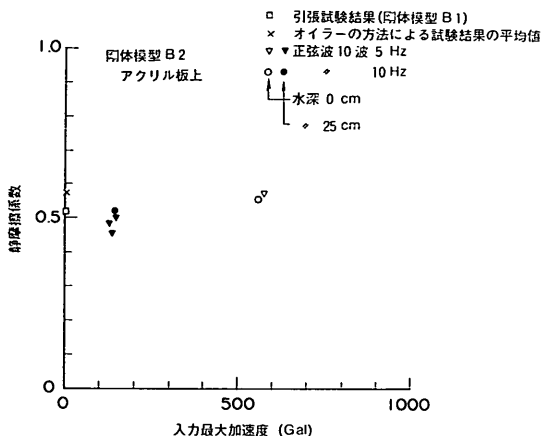


図-31 水のない状態と水深25cmのときの剛体模型の静摩擦係数

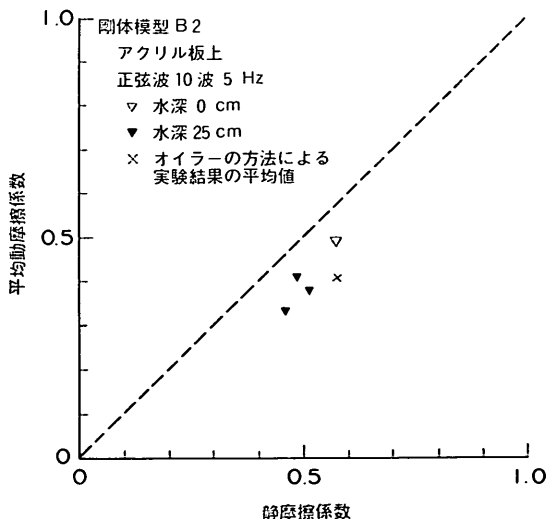


図-32 剛体模型 B 2 の静摩擦係数と動摩擦係数

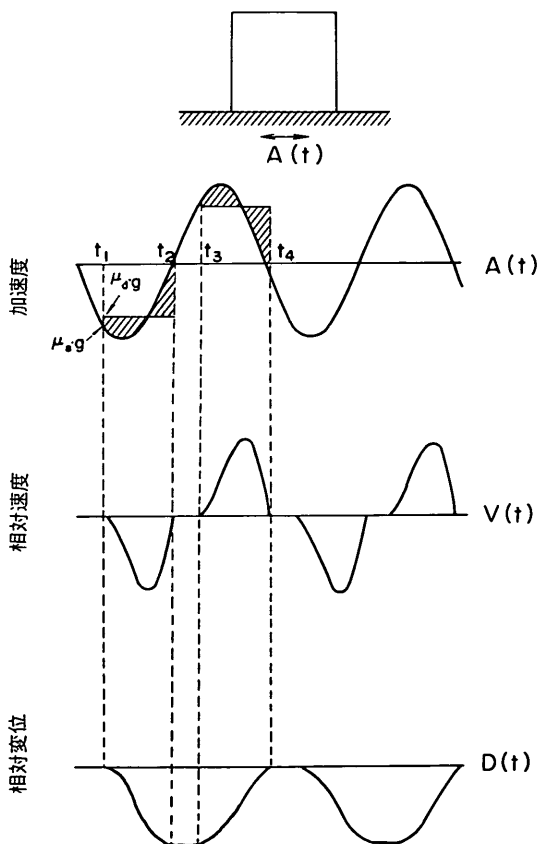


図-33 上下動がない場合の正弦波入力の場合の剛体の滑動

礎の入力加速度 $A(t)$ の間で差が生じる。なお、ここでは滑動開始時に静摩擦係数から動摩擦係数に不連続に変化し、滑動中は動摩擦係数は一定値をとるとする。この後、基礎の入力加速度は減少し方向をかえるため、剛体はそのまま一方方向に滑動を続けることなく、剛体と基礎の間の相対速度がゼロとなればまた基礎と剛体は一体となって振動する。この滑動開始から相対速度がゼロとなって滑動が終了するまでの剛体と基礎の加速度の差が両者の相対変位の大きさを決める。この剛体と基礎の相対速度を基礎の入力加速度 $A(t)$ と滑動している剛体の加速度 $\mu_d \cdot g$ の差より積分して求め、この相対速度をさらに積分すれば滑動変位が求まる。いま、図-33 に示すように時刻 t_1 において慣性力と静摩擦力が等しくなり滑動が生じるとすると、時刻 t における相対速度 $V(t)$ は

$$V(t) = \int_{t_1}^t (A(t) - \mu_d \cdot g) dt \quad (t < t_2) \quad (5)$$

となる。 t_2 は $V(t)$ が再びゼロとなる時刻である。 t_2 における滑動変位は、

$$D(t) = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (6)$$

となる。図-33 に示すように滑動変位は t_1 から t_2 まで増加する。 t_2 から次に滑動する t_3 までは剛体と基礎は一体となって振動するので剛体は滑動した変位のまま一定を保ち、さらに t_3 で滑動を開始するときは方向が逆となっているので滑動変位は t_4 まで減少を続け最初の

位置にもどる。このように正弦波の場合は1周期で剛体は最初の位置にもどる。しかし、これに上下動を考慮して、計算すると剛体は必ずしも一周期で最初の位置にもどらない。このこととこれまでの地震時滑動実験結果に示したように剛体の滑動変位は片方に残留するような変位を示したことから、上下動を考慮する必要があるように考えられる。したがって、この章の検討ではこの上下動を考慮するが、計算上は上下方向の慣性力が剛体に作用するとしてその影響を考えた。

Newmark の方法あるいは藤野他の計算手法は入力加速度とともに速度、変位を必要としているのに比較して、ここで示した方法は加速度記録より直接に地震時滑動変位量が計算できる。すでに述べたように地震記録は加速度波形であるので、その速度、変位は数値積分により求める必要がある。ここで示した方法はこうした計算の手間を必要としない。ただし、強震計で得られた加速度記録を滑動変位計算のための入力加速度とする場合には強震記録のゼロ線の補正を行う必要がある。

7.2 剛体の地震時滑動変位量の計算結果と実験結果の比較

7.1 で示した方法により剛体模型の地震時滑動変位量を計算した。計算は、次のように実施した。

- ①入力加速度は振動台の水平、上下加速度(AH1, AV1)とする。
- ②静摩擦係数、動摩擦係数は6.4の考え方で求めた値を使用する。

表-9 滑動変位の実験結果と計算結果の比較

CASE	No.	剛体模型	水深 (cm)	入力波形	入力最大 加速度 (Gal)	計算で使用する摩擦係数		滑 動 変 位 (mm)		
						静摩擦係数	動摩擦係数	実 験 値		計算値
								D 1	D 2	
1	9	A (アクリル板上)	0	正弦波, 10Hz	842	0.73	0.55	—	0.22	0.73
1	12	"	"	" , 20Hz	740	0.76	0.55	0.05	0.07	0.08
1	22	"	"	地震波	682	0.59	0.52	0.26	0.26	0.29
5	8	"	"	正弦波, 7Hz	690	0.68	0.53	0.40	0.41	0.26
5	4	"	"	" , 10Hz	726	0.69	0.57	0.18	0.27	0.30
3	34	B 2 (アクリル板上)	"	" , 5Hz	573	0.57	0.49	0.46	0.45	0.36
4	6	"	25	" , 5Hz	130	0.45	0.34	0.15	0.15	0.08
6	3	A (モルタル板上)	0	" , 10Hz	631	0.65	0.61	0.04	0.03	0.02
6	12	"	"	" , 20Hz	650	0.61	0.56	0.02	0.01	0.02

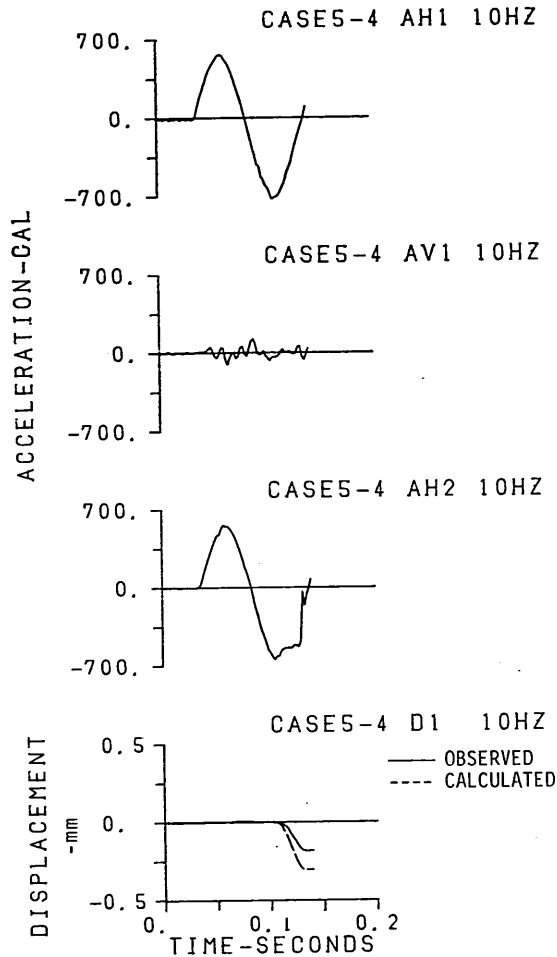


図-34 計算結果と実験結果の比較（剛体模型A，アクリル板上）

- ③ 正弦波10波加振で第1回めの滑動について計算する。
- ④ 水中の剛体模型の場合の水の影響は、剛体模型の片面に作用する動水圧の2倍を重力加速度で割った付加質量で評価する。

実施した計算結果を表-9に示す。表-9には計算したケース、用いた摩擦係数、滑動変位量の計算値と実験値を示す。また、図-34～36には滑動変位量の時刻歴を計算結果と実験結果を比較して示す。図-34は剛体模型Aで10Hz 正弦波10波加振の場合、図-35は剛体模型B2で5Hz 正弦波10波加振の場合、図-36は剛体模型Aで地震波加振の場合である。

表-9に示すように、計算結果が実験結果の3倍、0.5倍程度となっているのがそれぞれ1例あるが、その他はほぼ両者が一致している。したがって、剛体が大きな応

答を示さない場合には、ここで示した計算手法により地震時の剛体の滑動変位量が求められるものと考えられる。剛体の応答まで考慮した地震滑動変位計算手法は今後の課題である。

ここでの計算で用いた摩擦係数は振動実験結果から推定されたものである。剛体の地震時滑動変位量を計算するのにその都度振動実験を実施するのは困難な場合が多い。この場合にはオイラーの方法による摩擦係数測定実験結果が利用できると考えられる。

8. 結 論

剛体の地震時の滑動を検討するために、振動台上に置いた剛体模型の振動実験を実施した。この振動実験により剛体の地震時の滑動現象を把握し、これに基づいて剛

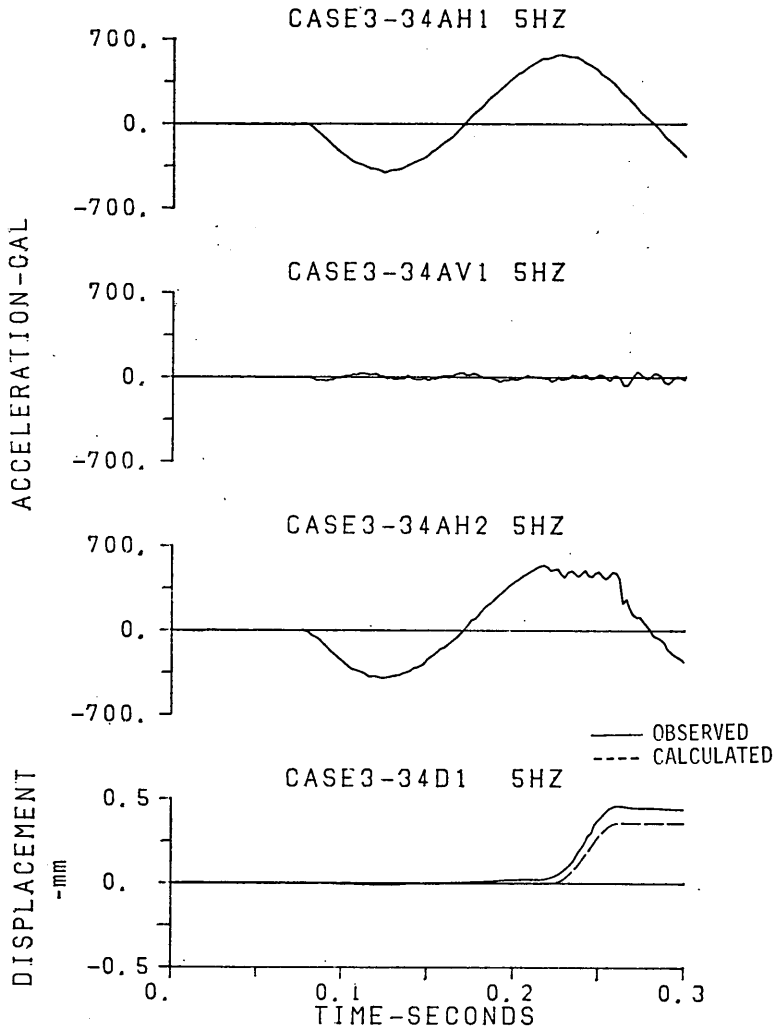


図-35 計算結果と実験結果の比較 (剛体模型 B 2, アクリル板上)

体の地震時滑動変位量計算手法を検討した。以下にとりまとめた結果を記述する。

(1) 静摩擦係数測定のための水平引張試験によれば、アクリル板上の剛体模型 B 1 の静摩擦係数は 0.52 であった (表-2)。オイラーの方法による摩擦係数測定実験結果によれば、アクリル板上の剛体模型 B 2 (剛体模型 B 1 と同種の模型) の静摩擦係数は 0.58 で、水平引張試験結果よりやや大きい値であった。動摩擦係数は 0.41 で静摩擦係数の約 70% であった。アクリル板上の剛体模型 B 1 の場合には、静摩擦係数が 0.66、動摩擦係数は 0.52 であった。この場合には動摩擦係数と静摩

擦係数の差は小さく、両者の比は約 80% であった (表-3, 4)。

(2) 剛体模型の地震時滑動実験によれば、剛体模型の加速度は滑動を開始するとほぼ瞬間的に減少し、滑動中はほぼ一定値をとるような波形を示した (図-6)。このことから、動摩擦係数は静摩擦係数から不連続に減少し滑動中は一定の値をとると仮定してもよいものと考えられる。

(3) 剛体模型の応答加速度波形より静摩擦係数と(2)の考え方によった滑動中の平均的な動摩擦係数を求めた。両者の値はオイラーの方法による摩擦係数測定実験より

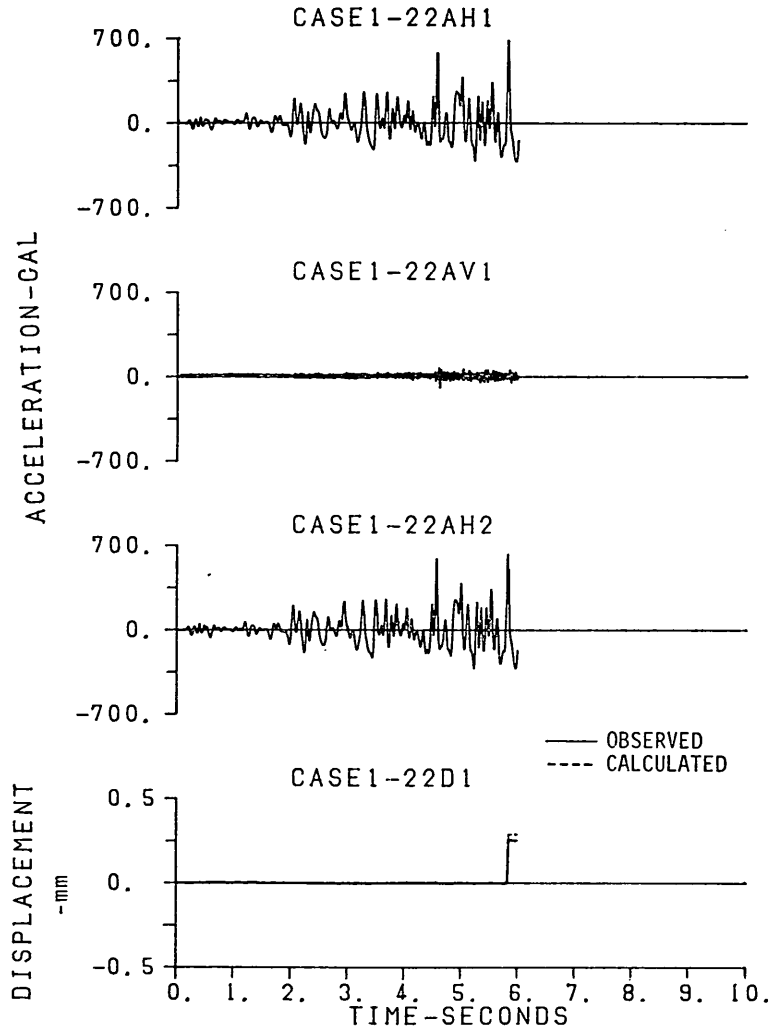


図-36 計算結果と実験結果の比較 (剛体模型A, アクリル板上)

求まった摩擦係数に近い値を示した (図-32)。

- (4)水中の剛体模型の地震時滑動実験によれば、剛体模型の片面に作用する動水圧の2倍を重力加速度で除した値に等しい付加質量を考慮して得られる摩擦係数は水がない状態の摩擦係数とほぼ等しい結果となった (図-31)。したがって、水中の剛体の地震時滑動変位量を計算する場合には、剛体に作用する動水圧を重力加速度で除した値に等しい付加質量を考慮すればよい。
- (5)剛体模型に作用する動水圧は、滑動を開始するとはほぼ瞬間的に減少し、滑動中はほぼ一定値を示すような時刻歴となった (図-13)。これは、剛体模型の加速度波

形とはほぼ同じである。

- (6)正弦波を入力した場合でも剛体模型の滑動変位量は片方にずれて残留するのがいくつかの場合観測された (たとえば図-6)。ある上下動を考慮すると正弦波を入力した場合でも剛体の滑動変位量は片方に残留する。このことから、剛体模型の地震時滑動実験において滑動変位量が片方にずれて残留するのは、上下動がおもな要因となっていると推定される。
- (7)剛体の地震時滑動変位量を剛体がのっている基礎の水平、上下加速度記録より計算する手法を示した。(2)~(6)を考慮した滑動変位量の計算結果は、ほぼ実験結果

と一致し、剛体が大きな応答を示さない場合には、ここで示した滑動変位量計算手法はほぼ妥当な計算方法であると考えられる(表-9, 図-34~36)。

9. あとがき

ここでの検討は重力式構造物の地震時滑動変位量の推定のための第1段階であり、実際の重力式構造物の地震時の滑動量を求めるためにはさらに詳しい検討が必要である。港湾構造物の場合には捨石上にコンクリートケーソン等が建設されることが多いので、捨石上のコンクリートケーソンの動摩擦係数を求める必要がある。アクリル板上のコンクリートケーソン模型のように簡単に動摩擦係数が求められないことが予想される。一方、重力式岸壁の場合には、岸壁背後の裏込めとの相互作用の問題、重力式岸壁に作用する外力が偏心することによる問題等が考えられる。捨石マウンド上のコンクリートケーソンの滑動を計算する場合には、マウンドとケーソンの動的相互作用を考慮した滑動変位量計算手法の検討も必要であると考えられる。今後さらにこれらの問題点について研究を進める予定である。したがって、現行の港湾構造物の設計法に関連した議論は現時点では行わず、さらに研究が進んだ段階で実施することとした。

(1984年6月27日受付)

謝 辞

報告をとりまとめるにあたり、構造部の方々、および水工部合田良実部長から貴重な助言をいただいた。特に、土田肇構造部長には剛体の地震時滑動変位量計算手法について教示していただき、また報告の内容に関しても適切な助言をいただいた。最後ではあるが、各位の方々に対し心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 土田肇・稲富隆昌・野田節男・上部達生・柳生忠彦・村田利治：港湾・海岸施設耐震性調査手法について、港湾技研資料, No. 336, 1980年6月
- 2) 上部達生：地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定, 港湾技研資料, No. 473, 1983年12月
- 3) 運輸省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1979年3月
- 4) Newmark, N. M. : Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Geotechnique*, Vol. 15, No.2, Jan. 1965

- 5) Franklin, A. G. and Chang, F. K. : Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis, *Miscellaneous Paper S-71-17*, U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Nov. 1977
- 6) Richards, R. Jr. and Elms, D. G. : Seismic Behavior of Gravity Retaining Walls, *Proc. of ASCE*, Vol.105, No. GT4, Apr. 1979, pp.449-464
- 7) Sim, L. C. and Berrill, J. B. : Shaking Table Tests on A Model Retaining Wall, *Proc. S.Pacific Reg. Conf. Earthq. Eng.*, Wellington, May 1979
- 8) Makdisi, F. I. and Seed, H. B. : Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-induced Deformations, *Proc. of ASCE*, Vol. 104, No. GT7, July, 1978 pp.849-867
- 9) 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, 地震研究所彙報, Vol.53, 1978, pp.461-480
- 10) 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剝離と滑動, 土木学会論文報告集, 第302号, 1980年10月, pp.31-41
- 11) Goodman, R. E., Taylor, R. L. and Brekke, T. L. : A Model for The Mechanics of Jointed Rock, *Proc. of ASCE*, Vol.94, No. SM3, 1968, pp.637-659
- 12) 上部達生・野田節男・千葉忠樹・檜垣典弘：水との連成を考慮した大型混成式防波堤の振動特性と動水圧, 港湾技術研究所報告, 第20巻 第4号, 1981年12月, pp.41-81
- 13) 會田範宗：摩擦の話, 岩波新書, G33, 1971年
- 14) 倉田栄一・井合進・横山淑子・土田肇：1978年宮城県沖地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No. 319, 1979年6月

記号表

- A : 入力地震度
 $A(t)$: 入力加速度(Gal)
 $D(t)$: 相対変位(cm)
 d : 最大変位量 (inches)
 g : 重力加速度
 N : 滑動するときの震度
 S : 物体のすべり落ちる距離(m)
 t_i : 時刻(s)
 t_s : 物体が所定の距離をすべり落ちるのに要した時間(s)
 V : 最大速度 (in./s)
 $V(t)$: 相対速度 (cm/s)
 θ_s : 物体がすべり始めるときの斜面の傾斜角
 μ_d : 動摩擦係数
 μ_s : 静摩擦係数