

水工学シリーズ 22-B-4

# 海岸工学および地盤工学における 模型実験の方法論

豊橋技術科学大学 准教授

松田 達也

株式会社 不動テトラ 総合技術研究所 副所長

久保田 真一

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2022年9月

# 海岸工学および地盤工学における模型実験の方法論

## Methods of Model Test on Coastal and Geotechnical Engineering

松田 達也, 久保田 真一  
Tatsuya MATSUDA, Shin-ichi KUBOTA

### 1. はじめに

構造物の建造や土構造物の造成, 自然災害メカニズムの解明とその対策など, 土木工学においては複雑な条件かつ未知の現象に対して適切な最適解を導き出す必要がある。例えば, 実際に起こり得る現象を明らかにするために, 事象に対して実物または実物と同等規模の模型を用いて実験的検討ができれば有益な情報が得られる。しかしながら, 実物または実物と同等規模の実験を行う際には実験コスト, 実験設備, 実験の再現性や安全性など様々な問題が生じると考えられる<sup>1,1)</sup>。そのため, 実際に起こり得る現象に対して, 土木工学においては厳密な理論, 模型実験, 数値解析を駆使して問題を解決してきた。このことは工学全般において取られる方法ではあるが, その中でも土木工学における特徴としては, 縮尺模型実験による現象解明が非常に重要な役割を担っており, 現在においてもその需要が高いことが挙げられる。

模型実験の魅力は, 設定した条件(入力)に対して, 必ず結果(出力)が物理量として, さらに, 映像として現象が視覚的に得られることである。ここで重要なことは, 如何に模型実験を実施するかということ, 入力条件が正しい場合でもその実施方法によっては, 正解値とは全く異なる結果が得られる可能性がある。そのため, 模型実験を実施するにあたっては, 実物で起きうる現象に対して, その現象を再現するために如何に「工夫」を施すかが重要となる。具体的には実験方法や相似則がそれに該当する。

本稿では, 海岸工学分野で実施されてきた「水理模型実験」および地盤工学分野で実施されてきた「地盤模型実験」について, 各分野で蓄積されてきた模型実験の方法論について事例を交えて説明する。

### 2. 海岸工学における模型実験の方法論

#### 2.1 模型実験の計画

##### (1) 模型縮尺の設定

海岸工学の分野では, 波浪や潮流などを外力として生じる諸現象が実験の対象となり, 縮尺模型を用いた水理模型実験が実施されている。縮尺模型を用いた実験では, 実物と模型の間で力学的な相似の関係を保つ必要があり, その関係を定めるものが相似則とよばれている。

水理現象を引き起こす主たる力は, 慣性力, 重力および粘性力の3つであり, これら3つの力の縮尺を同じにすることは, 実物で実験しない限りは不可能である<sup>2,1)</sup>。そのため, 縮尺模型を用いた模型実験において, 如何に相似条件を成立させるかが工学上の工夫のしどころであり問題点ともいえる。海岸工学においては, 波や流れが作用することによる物体の運動を対象とすることが多く, そのため, まず, 慣性力について相似にすることが求められる。具体的には, 慣性力と重力の比率を合わせる方法(フルード則), あるいは慣性力と粘性力の比率を合わせる方法(レイノルズ則)があるが, 海岸工学の分野, 特に構造物を対象とした水理模型実験では, 重力が粘性力よりも卓越する場合が多いため, フルード則に従って実験を行うことが多い<sup>2.1), 2.2)</sup>。

実験における縮尺の設定であるが、まず、使用する水槽の大きさや造波能力等に応じて縮尺の最大値が定められる。できるだけ大きな縮尺で実験を実施するのが理想ではあるが、より多くの費用がかかるため、データの信頼性確保の観点からの縮尺の最小値を踏まえた上で、経済性を考慮した適切な模型縮尺が決定されることが多い<sup>2,1)</sup>。

## (2) 実験施設

実験施設として使用する水槽は断面水槽(図-1)と平面水槽(図-2)に分類され、国内外における様々な機関がこうした水槽を保有している<sup>2,3)</sup>。断面水槽では、水理現象の断面的な特性を再現することができる。例えば、防波堤のケーソンの滑動安定性、消波ブロックの安定性、伝達波高、反射率、護岸の越波量などの検討において断面水槽を用いることが多い。平面水槽では、水理現象の3次元的な特性を再現することができる。例えば、防波堤の堤頭部や護岸の隅角部における諸検討において平面水槽を用いることが多い。

水槽には、波を起こすための造波機が設置されている。造波機には様々なタイプがあるが、ピストン型(鉛直な造波板を前後に往復運動させて造波)あるいはフラップ型(造波板の下端をヒンジとし、上端付近を前後に往復運動させて造波)が多く用いられている。一般的には、規則波に加えて、波の有する周波数スペクトルを再現した不規則波についての造波が可能であり、平面水槽では波の方向スペクトルを再現できる多方向不規則波造波機が設置されることがある。また、近年の造波装置は、反射波を吸収制御できるものが多い。また、造波機とともに送風機を備えた水槽もあり、例えば越波に与える風の影響を考慮することができる。その他、ポンプを用いた循環流装置が備え付けられた水槽では、潮流と波の同時作用の検討を行うことができる。循環流装置のポンプの能力が十分に大きければ、津波流れの実験を行うことも可能である。津波流れの実験では、上述したポンプを用いて行う方法の他に、チャンバー式による津波発生装置を用いて行われる場合もある(図-3)。チャンバー式とは、真空ポンプにより水槽内の水を吸い上げてチャンバー内に水を溜めておき、吸気バルブを開放することで、チャンバー内の水を水槽内に放水させるものであり、バルブの開放タイミングを調整することで、時々刻々と変化する津波波形を再現することができる。



図-1 断面水槽



図-2 平面水槽

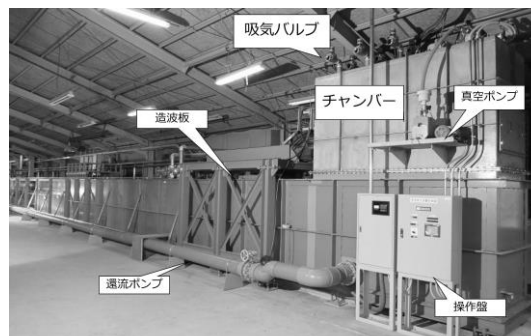


図-3 津波発生装置

## 2.2 模型実験の分類と対象

水理模型実験は、断面水槽実験と平面水槽実験に大別される。上述した断面水槽を用いる実験と平面水槽を用いる実験である。また水槽内には、海底床を模した模型床（固定床・移動床）が目的に応じて設けられ、各々、固定床実験および移動床実験と称される。

### (1) 断面水槽実験

断面水槽は水槽壁の片面がガラス張りとなっており、側面から観察することができる。一般的に、平面水槽と比べると断面水槽のほうが深く、造波能力も大きいので、平面実験よりも大きな縮尺模型で実験を行うことができる。防波堤などの連続構造物の標準部の検討を行う場合には、断面水槽実験が適用され、断面水槽の幅方向に断面形状が均一な模型を設置して実験が行われる。実験模型を乗り越えて波が背後に伝達する条件での実験においては、模型前面の水位が低下して背後の水位が上昇する場合がある。こうした水位変化が問題となる場合には、以下に示すような方法で水塊を沖側に戻すことが必要となる。

- ① 断面水槽に備え付けられている還流装置を使用
- ② ポンプを用いて模型背後の水を沖側に移動
- ③ 模型床の陸側と沖側に通水口をつくり模型床を通じて還流
- ④ 水路幅方向に仕切り壁を立て、仕切り壁のガラス面側に実験模型を設置し、反対側を還流水路として利用

### (2) 平面水槽実験

平面水槽実験では、海底地形や構造物の形状などによる3次元的な効果を検証することができる。すなわち、海底地形による波の取れん、護岸の越波量に対する隅角部や端部の影響、防波堤堤頭部における被覆材の安定性などを検討することができる。また、断面水槽実験では取り扱うことができない斜め入射波の検討を行うことも可能である。平面水槽実験においては、断面水槽実験よりも模型縮尺を小さくせざるを得ないことが多い。静穏度実験などの波高測定の実験では、波高が数cm程度に小さくなるまで模型縮尺を小さくすることもできるが、構造物の安定性を対象とする実験では波高が10 cm以上となるような縮尺を採用することが望ましい。

### (3) 固定床実験と移動床実験

水槽内には、海床を模した模型床が設けられる。モルタル等で作成した模型床を用いて実施する実験が固定床実験であり、砂で作製した模型床を用いて実施されるのが移動床実験である。固定床実験は、主に水位や流れの変化といった流体場の把握を目的とした実験といえ、それらに起因して引き起こされる構造物の安定性や波力といった作用外力の測定等の実験が行われる。移動床実験は、波や流れによる底質の洗掘現象や地形変化が対象となる。

## 2.3 計測対象と計測方法

計測対象に応じて機器を選択し、適切に計測を実施する必要がある。機器を用いて計測された実験データは、A/D変換によってデジタルデータとして記憶媒体に蓄積される。デジタルデータは、連続したアナログデータを離散化して得られたデータであり、対象とする現象を適切に捉えるため、その取扱いには注意が必要である。以下に、水理模型実験における代表的な計測対象と計測方法について示す。

### (1) 波高

波高の測定には、容量式波高計を用いることが多い。検出部を測定位置に設置し、検出部の容量線と水の間の電気容量が水位に追従して変化することを利用して、波高を計測するものである。

### (2) 流速

流速の測定には、プロペラ式流速計、電磁流速計、超音波式流速計、レーザードップラー式流速計などが用いられる。電磁流速計は計測モードの状態では露出させると検出部が熱で損傷してしまうため、常に水中にある状態でないと使用できない。プロペラ式流速計は水没と干出を繰り返す条件でも使用可能である。

ただし、気中に干出した状態でも風によってプロペラが回ると流速として検出するので、注意を要する。

### (3) 波力・波圧

構造物に作用する力の測定には、堤体全体に働く力（波力）を測定する場合と、任意の箇所における波圧を測定する場合がある。波力測定に用いられるのが分力計である。測定可能な項目として、水平力、鉛直力、モーメントが挙げられる。計測可能な成分の数により、3分力計、6分力計等がある。波圧の測定に用いられるのが波圧計である。構造物の表面に取り付けて、作用する波圧を圧力変動として測定するものである。分力計および波圧計ともに、ひずみを測定することにより物理量（波力、波圧）の変化を得る。

## 2.4 模型実験の手順

### (1) 模型の製作

#### a) 模型床の製作

水槽内には、海底勾配や現地地形を再現した模型床が設けられる。断面水槽では、一様勾配の海底勾配を再現し、検討対象位置に構造物模型を設置することが多い。既に述べたように、模型床には固定床と移動床があり、実験の目的に応じた模型床を製作する。

#### b) 構造物模型の製作

構造物模型は、アクリルや木材等で製作する。防波堤のケーソン模型や消波ブロック等、その挙動が実験対象となる模型については、比重が実物と同一となるように製作する。ケーソンの挙動を対象とする場合には、ケーソン模型内への水の出入りにより模型質量が変化しないように配慮する。ケーソン模型については、モルタルや木材、あるいはアクリルで製作する。その内部に重錘を入れて比重を調整するとともに、底面の粗度を現地と同じ摩擦係数にすることが望ましい。また、消波ブロックは、比重を調整したモルタルを用いて製作することが多い。構造物模型の例を図-4および図-5に示す。

### (2) 計測機器の設置

#### a) 波高計

水槽上の台車や架台を介して波高計を設置する。波高計の使用においては、昇降機（波高計を上下に移動させる装置）を併用することが多い。波高計は水面に対して鉛直になるように、また、センサー部がなだけ水路中央に位置するように設置する。図-6に容量式波高計の設置例を示す。

#### b) 流速計

波高計と同様に、水槽上の台車や架台を介して設置する（図-7）。センサー部の取付けの向きと計測対象となる流れの方向に留意して設置する。



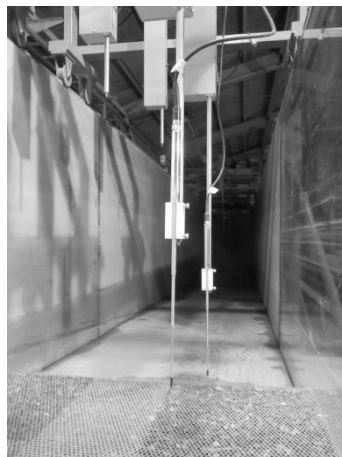
図-4 ケーソン模型  
(中央：アクリル製，両サイド：木製)



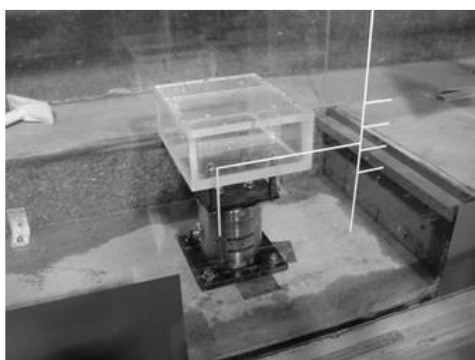
図-5 消波ブロック模型（モルタル製）



図－6 容量式波高計の設置例



図－7 電磁流速計の設置例



図－8 分力計の設置例



図－9 波圧計の設置例

### c) 分力計・波圧計

分力計は、測定対象の構造物模型の直下に設置する場合や構造物模型の背後に設置する場合がある。直下に設置する場合は、模型床内に分力計設置用の空間を設け、底面に強固に取り付ける（図－8）。また、分力計への模型の取付けも強固に行い、模型に作用する波力が適切に計測できるように注意する。波圧計は、測定対象の構造物模型の表面に取り付ける。取付けにあたっては、波圧測定面が構造物表面から突出しないように埋め込む形をとる場合が多い（図－9）。高感度の波圧計は、受圧面に定格荷重以上の圧力をかけると容易に故障してしまうので、取り扱いに注意する。

### e) キャリブレーション

実験で用いる計測機器（センサー）は、計測された値は各種の物理値（加速度、圧力、変位など）が出力されるわけではなく、例えば、電圧タイプの場合は電圧値 [V] を、ひずみタイプの場合はひずみ値 [ $\mu\epsilon$ ] の変化を計測した値が出力されることになる。そのため、計測値と物理値の関係性を予め調べておく必要がある。このことをキャリブレーションまたは校正という。

### (3) 通過波検定

模型床だけの状態で、実験に用いる波の検定を行う。実験条件となる水深、周期の条件で波を発生させ、造波板の振幅（造波機に入力する信号のレベル）と波高との関係をあらかじめ明らかにする作業であり、一般に「通過波検定」と称される。具体的には、沖側一様水深部の2箇所（沖波高）および実験対象とする構造物設置位置を挟む2箇所（岸波高）を測定し、入・反射波の分離推定法<sup>2,4)</sup>によりそれぞれの位置での入射波高を求める。なお、造波板などの反射境界面の近傍においては波高変化が激しいため、造波板

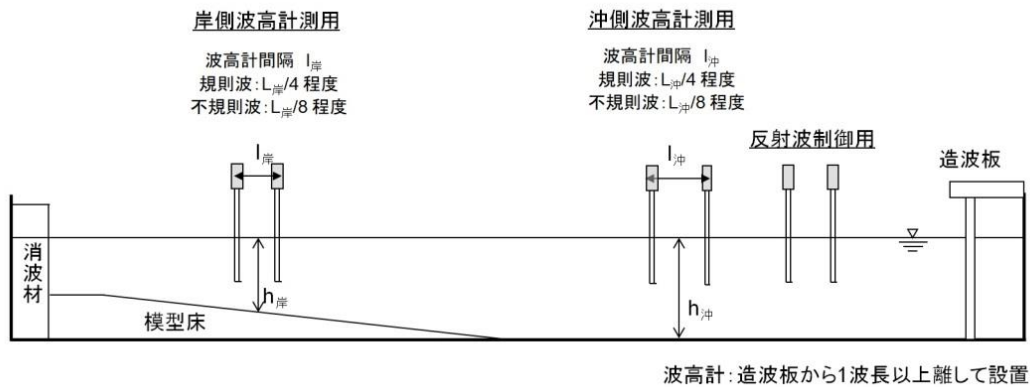


図-10 通過波検定時の波高計の設置例

から1波長以上離して波高計を設置する。図-10に通過波検定時における波高計の設置例を示す。一様水深部における有義波周期が目標とする有義波周期に一致するように造波信号の調整を行う。さらに入力波高を変化させ、一様水深部の波高（沖波高）と構造物設置位置の波高（岸波高）との関係を求めておき、構造物模型等を設置してもこの関係は変わらないものとして、一様水深部の波高（沖波高）から構造物設置位置での波高（岸波高）を推定するものである。なお、右端の2本の波高計は造波板による反射波吸収制御のための波高計である<sup>2,5)</sup>。また、実験水路の終端に消波材を設置して、水路終端の壁からの反射波を抑制しておくことが望ましい。

#### (4) 実験の実施

通過波検定後に、水槽内に構造物模型を設置し、あわせて各種計測機器を設置した後に実験を実施する。実験時はデータを収集するとともに、写真・動画等に実験状況を記録しておく。

#### (5) 実験データの解析および整理

前述した機器を用いて計測された実験データは、デジタルデータとして記憶媒体に蓄積される。データの取得においては、対象とする現象を適切に捉えるため注意が必要である。また、同一条件で実施した繰り返し測定の結果の比較により、再現性を確認することも重要である。

##### a) サンプリング間隔

実験データは、A/D変換によってデジタルデータとして得られる。連続したアナログデータを離散化して得られるため、その取扱いには注意が必要である。例えば、波高の計測に当たって波を正確に計測するには、1波（1周期）の中で10~20データのサンプリングが必要である。また、波力・波圧といった時間変化の激しい現象の計測においては、サンプリング間隔を1/1000秒単位に短くして、ピーク値をとらえる必要がある。

##### b) 測定時間

測定時間は、対象に応じて適切に決める必要がある。例えば、不規則波実験で有義波諸元を求める場合には、統計的に安定なデータを得るために、最低でも100~200波程度は取り込む必要がある。また、消波ブロックの安定性の検討等では1000波程以上必要となる場合もある。長周期成分を含んだ現象を対象とした場合には、その長周期に応じた測定時間を確保する必要がある。

##### c) 実験データの解析方法

波高計で計測された水位データの解析法としては、ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法がある。一般の波の場合には、どちらの方法を用いても不規則な波の周期と波高の代表値はほぼ同じであり、一般的にはゼロアップクロス法が用いられている。得られたデータより、最大となる波（最高波）や1/10最大波、有義波（1/3最大波等）、平均波などが定義される<sup>2,6)</sup>。流速計で測定されたデータによって流速の変動成分を求める場合には、波高計データと同様にゼロアップクロス法を適用する。波力・波圧のデータについては、ゼ

ロアップクロス法を適用できない場合がある。例えば、防波堤ケーソンの静水面より高い位置に取り付けた波圧計のデータには谷の側のデータがないのでゼロクロス概念を適用できない。波力・波圧を測定するケーソンなどの構造物の直前に波高計を設置し、波高計のデータのゼロアップクロス解析によって1波ごとの始まりと終わりの時刻を決定し、その時刻の範囲内の波力と波圧の最大値を検出して、1波ごとの極大値とする。これに対して統計処理を行い、最大値や1/10最大値、有義値、平均値などを整理する。なお、波力・波圧測定において、特に衝撃的な現象が対象となるケースでは、測定系の固有振動の影響が入る場合が多く、この影響を解析時に除くことが必要となる<sup>2,7)</sup>。

## 2.5 代表的な水理模型実験例

### (1) 構造物（ケーソン）に作用する波力実験

防波堤ケーソンに作用する波力を断面2次元断面水槽で計測した実験例である。実験水槽は、長さ55 m、幅1.2 m、高さ1.5 mである。海底勾配1/30のモルタル固定床上に防波堤模型を設置した（図-1 1）。設置水深は22.7 cmであり、ケーソン寸法は高さ23.8 cm、幅24.3 cmとした。波力計測用のケーソン模型はアクリル製であり、背面に三分力計を取り付けた。三分力計はH鋼で門型に組み立てられた架台から吊るす形で固定した。波力計測用ケーソンは水路幅方向に40 cmであり、その両側にはダミーの木製ケーソンを設置し、波力計測用ケーソンと接触しないように幅5 mm程度のクリアランスを設けた。ダミーのケーソンは波作用により動かないように、十分な重りを入れて固定した。捨石マウンドの表面は金網で覆い、波力計測用ケーソンの底面にマウンドに接触しないように5 mm程度のクリアランスを設けた。また、消波工の寄りかかり荷重が波力計測用ケーソンに作用しないように、消波工とケーソンの間に格子を設置し、消波ブロックがケーソンに接触しないようにした。防波堤模型の設置状況の写真を図-1 2に示す。実験波は修正Bretshneider-光易型スペクトルを有する不規則波を用いた。有義波周期 $T_{1/3}$ は1.67 sと2.14 sの2種類、有義波高 $H_{1/3}$ は1.9~10.7 cmの6種類とし、2種類の造波信号を用いた。造波信号の長さは819.2 sであり、それぞれの有義波周期で換算すると491波、383

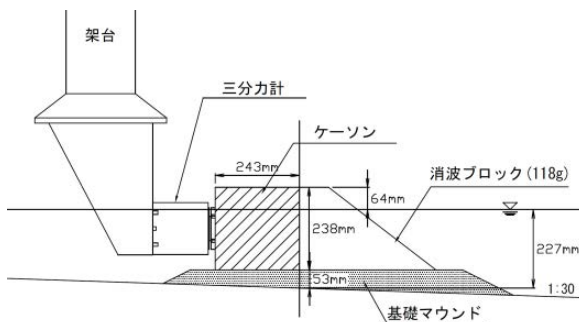


図-1 1 防波模型の断面図



図-1 2 防波堤模型の設置状況

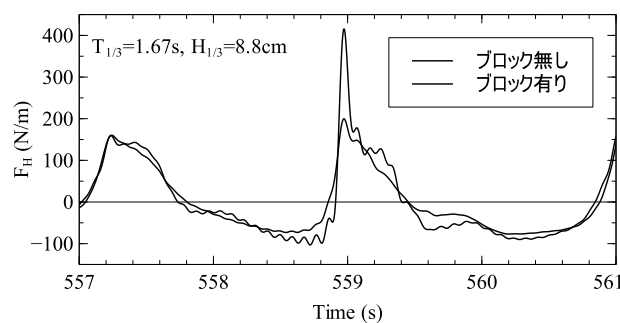


図-1 3 水平波力の時系列例

波相当となる。造波開始5分後から造波信号1サイクル分の波力を計測した。計測はサンプリング間隔1 ms (0.001 s)とした。本水槽は沖側と岸側の両端が配管で接続されており、越波による堤体背後の水位上昇は抑制される仕組みとなっているが、還流が追い付かない場合に背後の水位上昇による水圧の変化を補正する目的で、堤体背後にも波高計を設置した。図-13は、有義波周期 $T_{1/3}=1.67$  s, 有義波高 $H_{1/3}=8.8$  cmの条件における水平波力の時系列を示したものである。消波ブロックを設置することにより、波力の切り立ったピーク値が低減されていることが確認できる。

## (2) 消波ブロックの安定実験

防波堤前面に設置された消波ブロックの耐波安定性に関する実験例である。実験水槽は、長さ55 m, 幅1.2 m, 高さ1.5 mである。海底勾配1/30のモルタル固定床上に防波堤模型を設置した(図-14)。防波堤の設置水深 $h$ は26.9 cm, 基礎マウンドの天端上水深 $d$ は21.5 cmとし、防波堤の静水面上天端高 $h_c$ は7.0 cmと11.7 cmの2種類とした。相対天端高 $h_c/H_D$ はそれぞれ0.59, 0.99である。消波ブロック模型はモルタル製であり、事前に質量および密度を測定した。質量の平均値は154 g, 密度は2.30 g/cm<sup>3</sup>であり、質量が平均値の±3%以内のものを実験に使用した。

実験波は修正Bretshneider-光易型スペクトルを有する不規則波を用いた。有義波周期 $T_{1/3}$ は1.5 s, 1.8 s, 2.1 sの3種類, 有義波高 $H_{1/3}$ は8.5~17.5 cmの7種類とし, 2種類の造波信号を用いた。安定実験では小さな波ランクから作用させ, 順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は1000波とした。波高を増加させる際, ブロックの積み直しは行わず, 被害個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した被害個数を加えた累計数とした。水槽の側壁と接触するブロックは現地条件と異なるため, 観察対象から除いた。被害の基準は, ブロックの大きさの1/2以上の移動および90°以上の回転を被害ブロックとし, 被害ブロックの個数を観察対象ブロックの個数で除して被害率を算出した。

図-15は, 被害率と $K_D$ 値の関係を示したものである。相対天端高が大きい方が, ブロックの被害率が減少していることがわかる。相対天端高が大きくなることで天端付近の流速が小さくなり, ブロックに作用する流体力も小さくなるため, 被害が減少したものと考えられる。

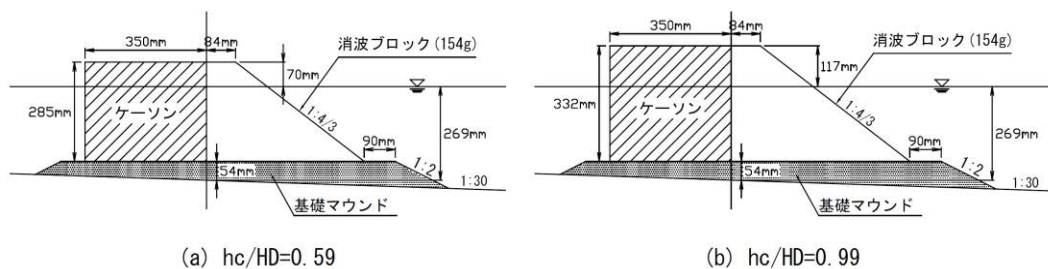


図-14 防波堤模型の断面図

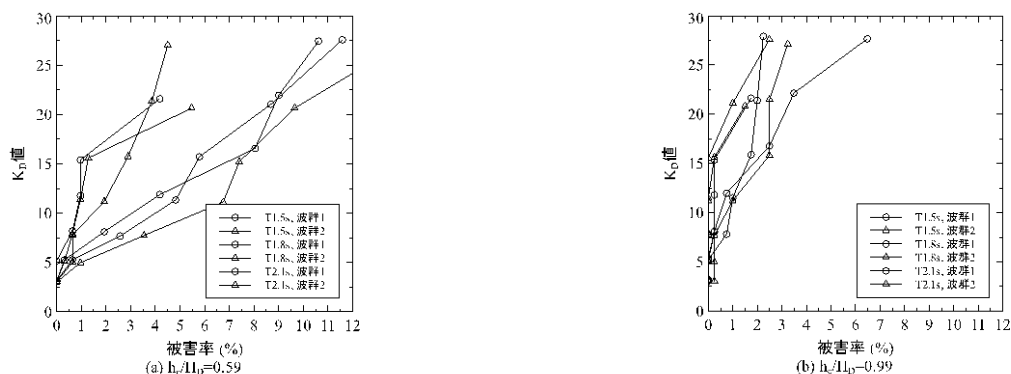


図-15 被害率と $K_D$ 値の関係

### (3) 津波越流に対する防波堤マウンド被覆ブロックの安定実験

防波堤を越流する津波に対する被覆ブロックの安定実験例<sup>2,8)</sup>を紹介する。用いた実験水槽は、長さ50 m、幅1.0 m、高さ1.5 mである。実験装置の模式図を図-16に示す。水槽の水平床の一部を幅方向に2つに仕切り、手前側の幅50 cmの水路内に防波堤模型を設置した。防波堤模型の港外側にはポンプ吐出口を挟んで越流堰を設置し、越流堰の高さを変えることで津波の高さを調整した。水中ポンプは出力19 kW、標準揚水量4.0 m<sup>3</sup>/minのものを使用した。

模型縮尺は1/50とした。腹付工の有無、腹付工天端幅、港内側水位、被覆材の種類および質量を変えて実験を行った。腹付工の高さはケーソン高さの1/3とした。ケーソン模型は津波作用により動かないように固定した状態で実験を行った。また、防波堤を津波が越流する際に越流水脈とケーソンとの間にできる空間を大気圧に保つために、ケーソン背後の仕切り壁に直径25 mm程度の空気孔を設けた。

安定実験では越流水深の小さい津波から作用させ、1 cm（現地量で0.5 m）刻みで越流水深を上げていき、被覆材の安定限界を調べた。津波の継続時間は、水位が定常状態となってから127秒間（現地量で15分間）とした。安定実験に先立ち、防波堤模型を設置した状態で越流の検定を行った。検定では、越流が定常状態となった時の港外側水位と港内側水位が目標値となるように、越流堰の高さおよび初期水位の条件を決定した。図-17は被災状況の一例である。法面の被覆ブロックが被災すると急激に被害が進行し、ブロックに被災が生じた約1分後（現地量で約7分後）には海底面までマウンドの洗掘が進行した。腹付工があることによって洗掘される時間を稼いでいるものの、被覆ブロックが被災し捨石が露出すると急激に洗掘が進行するという被災形態は津波越流による被災の特徴の一つである。また、越流水塊の打ち込みに対する被覆ブロックの安定性は港内側水位の影響を受け、港内側水位が高い方が安定限界の越流水深は大きくなる傾向が確認された。加えて、越流水塊の打ち込み位置がマウンドの天端部か法面部かによっても被覆ブロックの安定性が変化することも確認された。

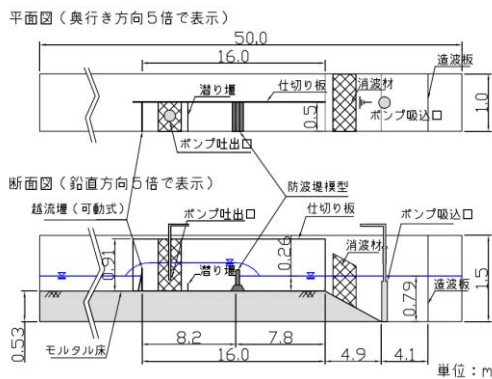


図-16 実験装置模式図

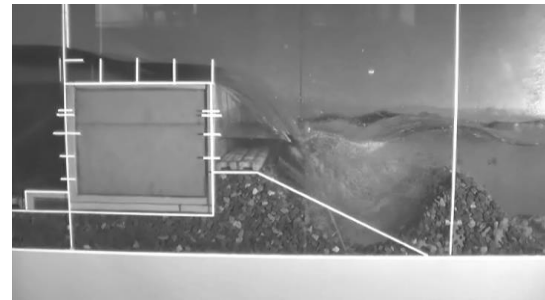


図-17 被災状況の一例

### (4) 長周期波対策構造物の消波性能確認実験

港内長周期波対策として防波堤背面等に設置される、マウンド構造物の消波特性を検討した実験例<sup>2,9)</sup>を紹介する。用いた実験水槽は長さ50 m、幅1.0 m、高さ1.5 mである。水槽内に長さ27 mの水平床を設け、港内の様水深部を再現した。入射波は規則波とし、現地量（本実験例では、数値は全て現地量で記載する）で周期30、60、90、120秒の4種類、波高は0.25 mから1.5 m程度までの範囲で変化させた。反射率の解析に用いた容量式波高計は、水平床の中間に波高Lの1/4の間隔で設置した。反射率は合田ら<sup>2,4)</sup>の入・反射波分離推定法を適用して求めた。縮尺は1/50である。図-18に示すとおり、検討断面は既存の干出型、および天端が静水面に位置する没水型の断面とした。マウンドを基礎捨石（50～200 kg/個）で形成し、被覆層に用いる材料の種類や大きさを変えて実験を行った。水深は7 mから16 mまでの4種類とし、水深10 mのケースでは構造

物幅を15 mおよび30 mに変えて実験を実施した。

図-19に、干出型および没水型について、被覆層に被覆石と8t型消波ブロックをそれぞれ二層被覆で用いた時の波高と反射率の関係を周期別に示す。被覆材の種類によらず、同一の周期に対して、没水型は干出型より反射率が低いことが確認された。

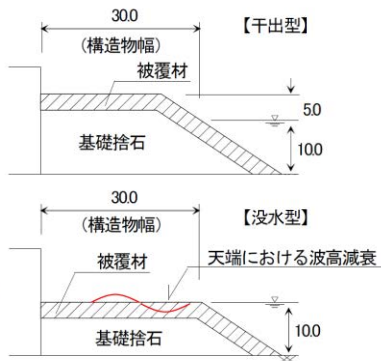


図-18 検討断面図の例 (単位:m)

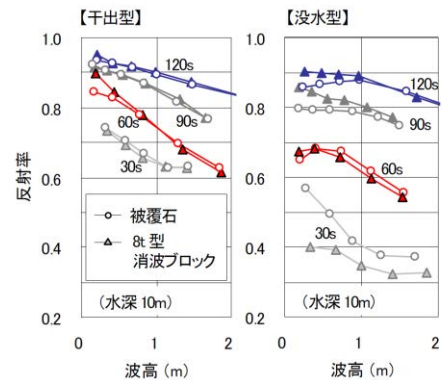


図-19 波高と反射率の関係

### 3. 地盤工学における模型実験の方法論

#### 3.1 模型実験の計画

模型実験は、様々な制約条件のもとで実施する必要がある、そのために事前の実験計画が重要となる。特に、実際の複雑な現象を理想化あるいは単純化させたうえで、その模型から様々な情報を得るために、どのように模型実験を実施するかを決める必要がある<sup>3.1)</sup>。ここでは、実験計画で検討する相似比と実験方法について説明する。

##### (1) 相似比

対象とする現象に対して実物と模型との関係が相似となる条件を決める必要がある。ここで、相似とは、「幾何学的相似」、「運動学的相似」、「力学的相似」の3つの相似条件である<sup>3.2)</sup>。相似則については、「現象に関する物理量をもとに無次元量から相似比を決める方法」、「現象に関する力の比をもとに無次元量から相似比を決める方法」、「現象を支配する方程式から相似比を決める方法」が挙げられる。相似則の決定に際して、使用可能な実験設備等も制約条件となる。地盤模型実験においては、実験で用いる地盤材料の選定も非常に重要である。例えば、粒径を幾何学的相似則に従うように地盤材料の選定を行うと、縮尺比が小さい場合は、実物と模型で材料種別が異なり、力学的相似性を得ることができない。

##### (2) 模型実験の方法

模型実験の目的としては、一般的に確認実験 (Pilot experiments) と量産実験 (Production experiments) に分類されている<sup>3.3)</sup>。模型実験で観測された現象が実現象と相似になっているかを確認する目的で行う実験を確認実験という。さらに、確認実験において相似が確認されたうえで、模型を実物の代用として行う実験を量産実験という。地盤工学においては“Modeling of models”と“Modeling of prototypes”と呼ばれる手法がある<sup>3.4)</sup>。岡村らによると、“Modeling of models”は同一寸法の実物に対して遠心力模型実験を異なる縮尺比で行い比較するものとされており、異なる縮尺比において実験の妥当性を確認したうえで、模型実験の結果をもとに実現象を予測する方法である。一方で、“Modeling of prototypes”は遠心力模型実験と対応する実物を比較する方法とされている。

#### 3.2 模型実験の分類と対象

地盤工学における模型実験では、地盤材料の力学的特性を支配する構成要因を踏まえた相似則が導出されて<sup>3.5)</sup>、重力模型実験が行われてきた。一方で、土構造物の安定問題、構造物-地盤の相互作用による支持力

問題などを検討する場合、地盤の自重応力が重要なため、地盤の応力状態を実物と模型で等価にする必要がある。そのため、模型において実物と等価な応力場を再現するための工夫として、模型に遠心力を载荷した条件下での実験に関する相似則が導出され<sup>3,6)</sup>、遠心力模型実験が行われてきた。本稿では詳細な説明は割愛するが、書籍「水理模型実験の理論と応用」<sup>3,7)</sup>では、重力場および遠心力場における実験方法について、具体的な事例を紹介しながら各実験方法の長所と短所について詳細に説明しているので、参照されたい。

### 3.3 計測対象と計測方法

実験中の物理的・力学的現象を定量的に評価するため、計測機器（センサー）を用いる。近年、センサー技術開発は著しく発展しており、小型で安価なセンサーが次々に開発されている。現在では、加速度・速度・位置、角速度・角度、力、圧力、ひずみなどを高精度で計測できる。地盤工学における模型実験でよく用いられる計測機器を「水理模型実験の理論と応用」<sup>3,7)</sup>で紹介している。計測機器には定格容量や応答速度（時間）など機器固有の特徴があるため、その特徴を知り、現象を踏まえて適切な計測機器を選ぶ必要がある。

### 3.4 模型実験の手順

#### (1) 境界の設定

実験で対象とする領域は、実験装置および実験土槽の寸法などの制約条件と相似則を踏まえて設定される。多くの模型実験では土槽を用いた実験が実施され、主に剛な壁面による境界条件が想定されるが、変形を拘束することで実際の現象と異なる現象となる可能性があるため注意が必要となる。例えば、境界の影響を低減するため、動的問題を対象とした検討では、せん断土槽と呼ばれる実験土槽を用いる工夫がとられている。

#### (2) 模型地盤の作製方法

##### a) 砂地盤の作製方法

模型に用いる地盤材料としては砂や粘性土が利用されてきたが、実際の土は砂あるいは粘性土のみで構成されているとは限らず、礫や砂、シルト、粘土が混合している場合が多い。しかしながら、粒径の異なる土粒子が混合した地盤の挙動は複雑であるため、模型実験では単純化して砂あるいは粘性土を単体で用いることが多かった。本稿では、砂の模型地盤の作製方法について述べる。

過去に用いられてきた主な砂地盤の作製方法としては、以下に述べる方法が挙げられる。

- ① 砂ホッパーを用いた自由落下による方法
- ② 単純にスコップで砂を積み重ねる方法
- ③ 水を予め試料容器内に入れておいて砂を少量ずつ水面上に降らせて砂を水中落下させる方法
- ④ 砂と水を混合して積み重ねる方法

方法①は、砂を入れるタンクの下部の排出口の径を絞って、砂を自由に落下させて堆積させる。砂が広く堆積するようにふるいを介して砂を落下させる場合もある。

方法②は、スコップなどで単純に砂を積み上げる方法である。予め重量を計測しておいた砂を土槽内にまきだし、大型模型ではタンパやランマ等を用いて、小型模型では突き棒等を用いて所定の層厚になるように仕上げる場合もある。

方法③は、均一かつ気泡を含まないように砂粒子を少量ずつ水面上において、砂粒子を水中落下によって堆積させる方法である。少量ずつ砂を降らせるために、時間を要する方法と言える。

方法④は、砂を水で湿らせておいて、手やスコップで積み上げていく方法である。

これらの砂地盤の作製方法の違いによって出来上がる砂地盤の均一性や相対密度は大きく異なる。また、実験ケース毎の再現性も異なる。4つの方法の中で、均一性、相対密度の管理、再現性などの点で最も優れているものは方法①の砂ホッパーを用いた自由落下による方法と考える。

##### b) 相対密度の調整

砂を用いた実験を行う場合、砂地盤の詰まり具合（相対密度）は地盤の変形や破壊挙動に大きな影響を与えるため、相対密度の管理はとても重要である。ここで、相対密度 $D_r$ は次式で表され、

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

$e_{\max}$ は最大間隙比、 $e_{\min}$ は最小間隙比、 $e$ は間隙比をそれぞれ示している。相対密度による凡その指標として、 $0 \leq D_r < 40\%$ ：緩詰め、 $40\% \leq D_r < 65\%$ ：中密、 $65\% \leq D_r \leq 100\%$ ：密詰めと考える<sup>3,8)</sup>。

例えば、せん断特性一つをとっても、緩詰めの地盤はひずみとともにせん断抵抗力が増すが、密詰めの地盤はピーク値を示した後に軟化することもある。また、水中下において細砂で形成した地盤の密度が小さければ、振動によって砂地盤は詰まろうとして間隙水圧が上昇し、地盤の液状化が発生する。地盤が液状化すると、剛性や強度は大きく低下するため、地盤の変形・破壊挙動も大きく変化する。このため、再現しようとする実物の地盤条件を考慮し、適切に地盤の相対密度を設定することが重要である。

先述のように、代表的な砂地盤の作製方法としては、① 砂ホッパーを用いた自由落下による方法や、② 単純にスコップで砂を積み重ねる方法、③ 水を予め試料容器内に入れておいて砂を少量ずつ水面上に降らせて砂を水中落下させる方法、④ 砂と水を混合して積み重ねる方法などがある。方法②では不均質な地盤が作製されるだけでなく、相対密度も実験ごとに変化してしまい、その値も積み重ねる方法によって様々である。ただし、先述のとおり予め重量を計測しておいた砂を土槽内にまきだし、機械的な締固め等により所定の層厚になるように仕上げることで、地盤全体の密度をある程度管理することも可能である。方法③や④においては相対密度を調整することが難しく、単一の比較的緩い砂地盤が形成される。緩い砂地盤を作製できるため、液状化実験などに採用されてきた。一方、方法①の自由落下方式では、相対密度を調整することが可能であり、この方法が最も広く採用されている。具体的には、砂を入れたタンクの下方の排出口の径やスリット幅を絞って砂を落下させるが、その落下高さや、口径・スリット幅、落下時にふるいを通過させるかどうかなどの条件を変えると相対密度を変化させることができる<sup>3,9)</sup>。

### c) 飽和度の管理

砂の実験を行う場合、飽和度の管理も重要な点である。水中下の砂地盤と言っても、飽和した地盤と空気を含んだ地盤では、それらの挙動はまったく異なるためである。地盤工学では、間隙の体積 $V_v$ に占める間隙水の体積 $V_w$ の割合を飽和度 $S_r$ と定義し、

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2)$$

で表され、0%は間隙が空気で満たされた完全に乾燥した状態、100%は間隙が完全に水で満たされた飽和状態となる。その間は、間隙に空気と水が混合した状態で不飽和状態となる。

飽和度の難しい点は、それが地盤の挙動に与える影響の感度の高さにある。飽和度に対して線形的に挙動が変化するのではなく、例えば、飽和度が95%の土と100%の土では、飽和度の違いはたった5%であるが、それらの水圧伝播特性は大きく変わる。水圧を伝播しようとしても空気が内蔵すると気泡が圧縮してしまい、水圧が伝播しにくいためである。間隙水圧の大きさは地盤の剛性や強度に大きな影響を与えるため、結果的に模型実験の結果に大きな影響を与える。よって、模型地盤の飽和度を把握して管理することは重要である。

遠心力模型実験などの比較的小さな模型を用いる場合、要素試験の手法をまねて、図-20(a)に示すようなシステムで二酸化炭素置換と脱気状態での通水が行われることが多い。この方法で地盤を飽和させれば、要素試験での飽和度と近くなるため、模型実験の結果を解釈しやすい。二酸化炭素置換や脱気の有無が飽和度に与える影響についてはTakahashi et al.<sup>3,10)</sup>が調べている。ただし、二酸化炭素による置換や脱気槽の準備などの手間がかかる。また、通水時間の長さも問題で、粘性流体を用いる実験では、通水時間に1~2日間を

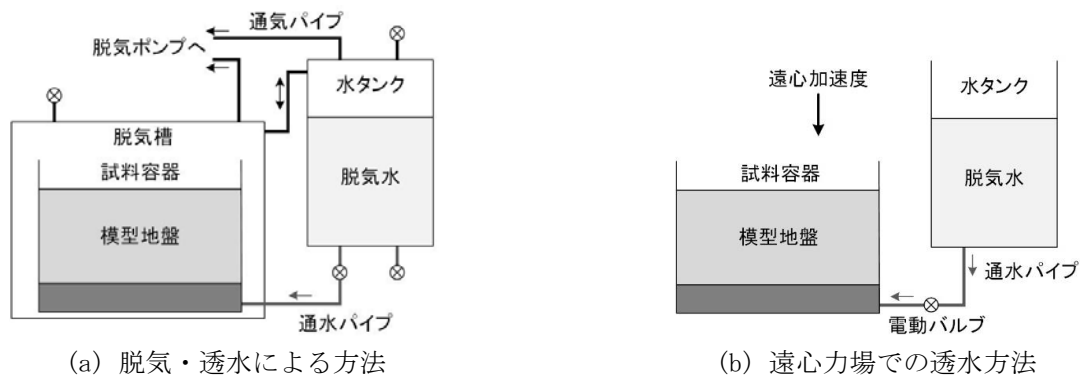


図-20 地盤の飽和方法

要する．そこで最近では，Okamura and Inoue<sup>3,11)</sup>が提案した遠心力場で通水する方法が採用されるケースが増えている．この方法は，乾燥した状態で砂地盤を作製しておき，模型に遠心力をかけた状態で通水を行う方法である（図-20 (b)参照）．遠心力を地盤にかけておくことで，浸透時におけるサクションによる水の吸い上げ量を小さくすることができ，間隙水内にトラップされる気泡を大幅に減らすことができる．また，土被り圧が大きくなるために，大きな水圧で水を流し込むことができ，短時間（粘性流体であっても数時間）で通水が可能である．

重力場の模型実験における水を含んだ砂地盤の作製方法としては，水を予め試料容器内に入れておいて砂を少量ずつ水面上に降らせて砂を水中落下させる方法や，砂と水を混合して積み重ねる方法，乾燥地盤を作製して単純に水を浸透する方法などが多い．重力場の実験では，比較的大きな模型が用いられることが多く，脱気することや遠心力を加えて通水することが難しいためである．ただし，水中落下方法では1粒ずつ砂を落下させることは難しく，ある程度の塊で砂を降らせることになり，その塊内に気泡が残る可能性が高い．また，予め砂と水を混合させる場合と脱気を行わずに水を浸透させる場合においても，地盤内に気泡が残る．このため，重力場の実験においては，地盤は完全には飽和していないことに注意する必要がある．飽和度を知る方法としては，弾性波速度やサクションなどを計測して間接的に知る方法が考えられている．

### (3) 計測機器の動作確認とキャリブレーション

実験により現象を定量的に評価するために，模型に計測機器を設置してデータを取得する．計測機器により取得したデータは電圧やひずみ等であるため，求めたい物理値（加速度，圧力，変位など）に変換するための校正係数を得るキャリブレーションを行う必要がある．通常は予め校正係数を得ておくが，模型実験のセットアップの際に計測機器が正常に作動するかを確認するためにも実施するとよい．

### (4) 実験データの取得と留意点

実験により現象を定量的に評価するために，模型に計測機器を設置してデータを取得するが，計測機器の設置位置については，予備実験を実施して適切な設置箇所を検討する．また，同時に予想される物理量と同等の値が計測できているか，その応答値を確認する．縮尺比が小さい小型の模型実験を実施する場合，計測機器が模型に対して相対的に大きいと現象を阻害する可能性がある．また，有線の場合はケーブルの剛性や太さ，設置方法によっても現象に影響を及ぼす可能性があるため，影響が最小限となるような工夫を施す．遠心力場の実験においては，配線・固定方法が不十分であると，断線等により計測が不能となることや，計測機器に遠心力が加わって飛ばされてしまうなど，場合によっては重大な事故へとつながる可能性も考えられるため，慎重に確認する．土中の現象を計測する場合，例えば，計測機器を土槽に固定する方法や土中に埋設する方法が考えられる．土中に埋設する場合は，土中に直接敷設する方法や，固定具を作製して設置する方法が挙げられる．近年は，3Dプリンタを用いて固定治具を作製するなど，様々な工夫が施されている．

用いる計測機器において，例えば，加速度計，圧力計，土壌水分計，ひずみケージなどは，空間における点でのデータを取得することになる．点データは局所的な変化を捉えることができるが，計測されたデータ

が現象と対比して妥当な数値であり，その変化を適切に計測できているかを見分けるためにも，複数の計測機器を用いる．また，例えば，力計（ロードセル）や変位計は面や空間などの圧力値やひずみ値を積分した値を得る計測機器であり，それらと組み合わせて空間としての物理量変化を捉えることも重要である．

計測機器以外に，AV機器を用いて現象を撮影し，視覚的に現象を考察する．地盤工学をはじめ，土木工学における模型実験では，実構造物の特徴から，平面ひずみ条件を仮定した二次元断面による検討が多く行われている．その場合，土槽側面の一部を可視化窓とし，可視化窓を介して模型断面に生じる現象を撮影する．平面ひずみ条件を満足するためには，土槽境界による断面直交方向の変位をゼロとし，かつ，断面平行方向のせん断応力をゼロにする必要がある．また，模型断面に生じる現象が奥行き方向に一樣に発生すると仮定するためにも，可視化窓と模型断面の摩擦を極力生じさせない工夫が必要となる<sup>3.1)</sup>．

### 3.5 代表的な模型実験例

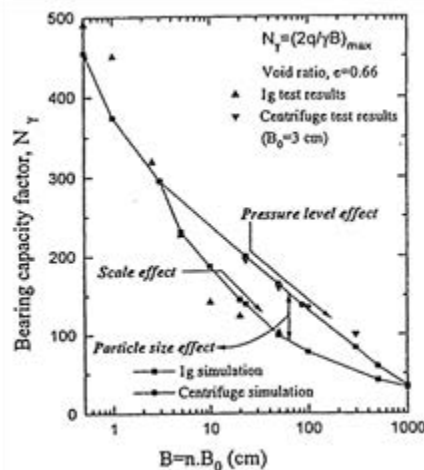
#### (1) 砂地盤の鉛直支持力を対象とした静的載荷実験

砂地盤の鉛直支持力を対象に既往の検討例を説明する．Tatsuoka et al.<sup>3.12)</sup>は砂地盤上の帯基礎の支持力問題を対象として，重力場と遠心力場の模型実験を行い，両者で同一の地盤材料を用いたModeling of Prototypeを行っている．図－2 1に各実験で得られた結果と有限要素解析によって得られた結果をもとにした実物に換算した基礎幅と支持力係数の関係を示す．龍岡ら<sup>3.13), 3.14)</sup>は寸法効果 (scale effect) を圧力レベル効果 (pressure level effect) と砂粒子と基礎幅の相対的大きさの効果 (grain size effect) の足し合わせとして定義しており，図－2 1を見るとある範囲の中で粒子寸法効果が顕著に生じることを示している．

#### (2) ケーソン－捨石構造への組み合わせ荷重による支持力を対象とした静的載荷実験

ケーソン－捨石構造の支持力問題について，松田ら<sup>3.15)</sup>による破壊モードに着目した重力場実験におけるModeling of Modelsの検討について説明する．対象とした実験は，菊池ら<sup>3.16)</sup>による，実物に対して縮尺1/10で実施された大型実験（以下，大型実験と称す．）である．これに対して，松田らは菊池らが想定した実物に対して1/25縮尺（大型実験の1/2.5縮尺）の模型実験（以下，中型実験と称す．）で検討した（図－2 2）．中型実験では幾何学的相似を考慮した無筋コンクリート製のケーソン（重量4.27 kN）と，砕石6号（粒径5～13 mm混合）を捨石材として使用した．捨石マウンドの形状は，捨石マウンド層厚 $H_M$ を400 mm，肩幅 $W_{ToM}$ を840 mmとした．ケーソンと捨石間の摩擦係数は大型実験で0.75，中型実験で0.65であった．

ここでは，偏心荷重載荷試験について説明する．中型実験は同条件で2回実施している．図－2 3に大型実験と中型実験におけるケーソンの挙動を比較した結果を示す．載荷初期はケーソンが滑動した後，傾きながら



図－2 1 帯基礎の支持力実験による粒子寸法効果<sup>3.12)</sup>

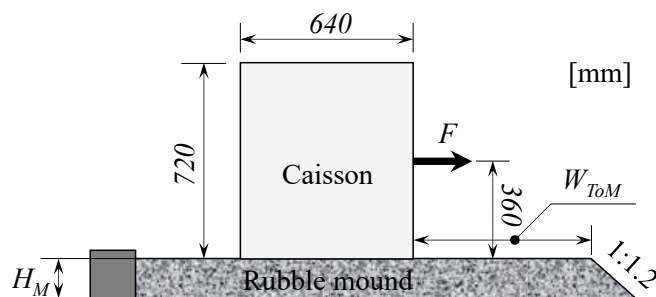


図-2.2 ケーソン-捨石構造モデルの概略図

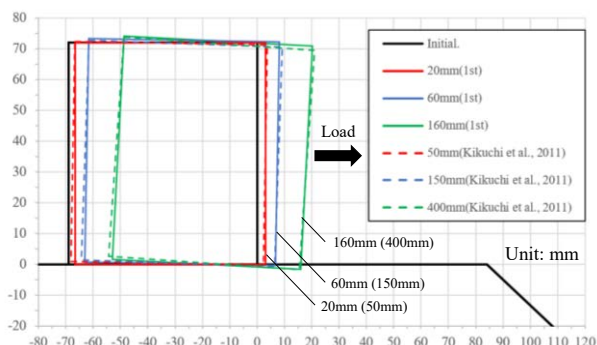


図-2.3 偏心荷重によるケーソンの挙動

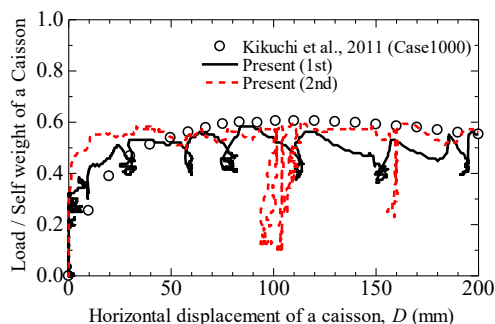


図-2.4 無次元水平荷重-換算水平変位

滑動し続けた。さらに荷重を継続すると、ケーソン後趾が捨石マウンドへめり込むように沈下し、ケーソンの傾斜が拡大した。図に示すとおり、中型実験結果は大型実験結果で得られたケーソン挙動を良好に再現していることがわかる。

図-2.4にケーソンの無次元水平荷重-換算水平変位関係を示している。ここで、無次元水平荷重とは、ロードセルにより得た水平荷重をケーソンの自重で除した値である。大型実験では水平変位が110 mmのときに摩擦係数が0.61であったのに対し、中型実験における摩擦係数（上限値）は換算水平変位100~120 mmにおいて0.563（1回目）、0.604（2回目）であった。中型実験の結果は、大型実験の荷重変位関係を比較的精度よく再現していることを確認した。

本稿の冒頭で述べたが、現象を詳細に解明するためには、模型実験に加え、数値解析が非常に強力なツールとなる。松田ら<sup>3.17)</sup>は、大変形問題に適用可能である個別要素法（Distinct Element Method、以降はDEMと称す。）<sup>3.18)</sup>を用いた高精度シミュレータの開発を目的とし、模型実験をベンチマークとした数値実験を行った。ここで、DEMとは不連続体モデルに基づく解析手法であり、計算要素を剛体として接触し合う計算要素の接触力をもとに運動方程式を解く手法である。本稿では、図-2.2に示すケーソン-捨石構造において、捨石マウンド層厚 $H_M$ を180 mm、肩幅 $W_{ToM}$ を320、640 mmとした条件で検討した事例について紹介する。

本検討では2次元解析を行っており、計算要素は円形とした。ケーソンは粒径10 mmの粒子を剛体結合することでモデル化した。捨石マウンドは砕石6号の粒径を考慮して5、9、13 mmの3粒径を均等な発生確率で生成した。また、粒子形状に伴う回転抵抗を模擬するため、次式の転がり摩擦モデル<sup>3.19)</sup>を導入した。

$$M_r = -\text{sgn}(\omega') \cdot |F_{ij}^N| \cdot b \cdot r \quad (3)$$

ここで、 $M_r$ は着目粒子 $i$ の転がり摩擦モーメント、 $F_{ij}^N$ は着目粒子 $i$ と接触粒子 $j$ 間に生じる法線方向の粒子間力、 $r$ は着目粒子 $i$ の粒子半径、 $\omega'$ は着目粒子 $i$ の角速度、 $b$ は転がり抵抗係数である。

図-25に無次元水平荷重-水平変位関係を示す。水平荷重はケーソンを構成し捨石と接触している粒子に作用する水平合力をケーソンの自重で除した無次元水平荷重を示している。水平変位はケーソンの傾きの影響が少ない重心位置の変化を示している。また、同図内にはケーソンの滑動限界<sup>3,20)</sup>を示している。DEMで得られた無次元水平荷重-水平変位は、両ケースともに実験で得られたトレンドをよく再現できている。捨石マウンドの肩幅が狭い場合、荷重初期に滑動限界に到達したのち、水平変位70 mm程度で低下が見られる。一方で、肩幅が広い場合では、荷重初期に滑動限界に到達したのちに、水平変位210 mm程度まで荷重を維持し、その後、低下する傾向を確認した。

マウンド肩幅 $W_{ToM} = 640$  mmを対象に、模型実験時に撮影した画像を基にしたPIV解析により求めた変形速度分布を図-26 (a) に、DEMにより得られた粒子の変形速度分布を図-26 (b) にそれぞれ示す。上図は最大無次元水平荷重到達時（ケーソン滑動量65 mm）を、下図は最大無次元水平荷重低下開始時（ケーソン滑動量215 mm）をそれぞれ示している。

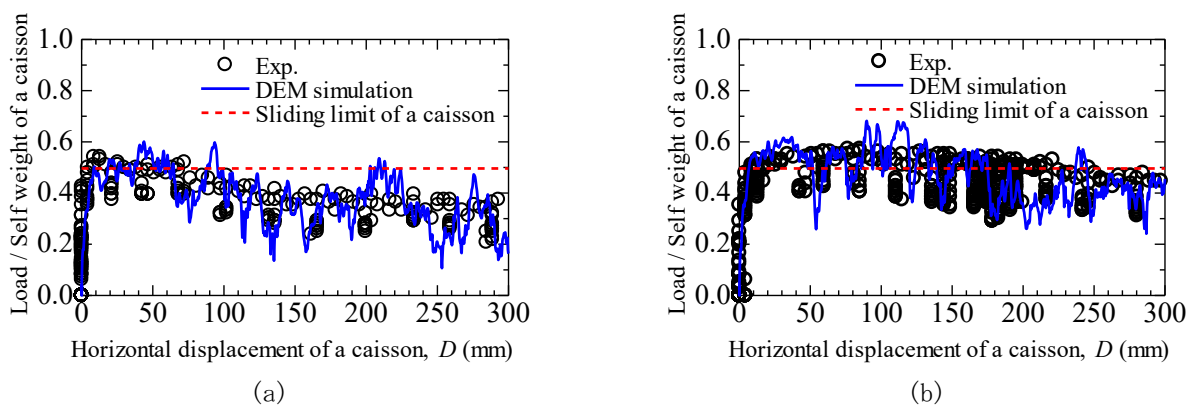


図-25 無次元水平荷重-水平変位：(a)マウンド肩幅 $W_{ToM} = 320$ mm; (b)マウンド肩幅 $W_{ToM} = 640$  mm

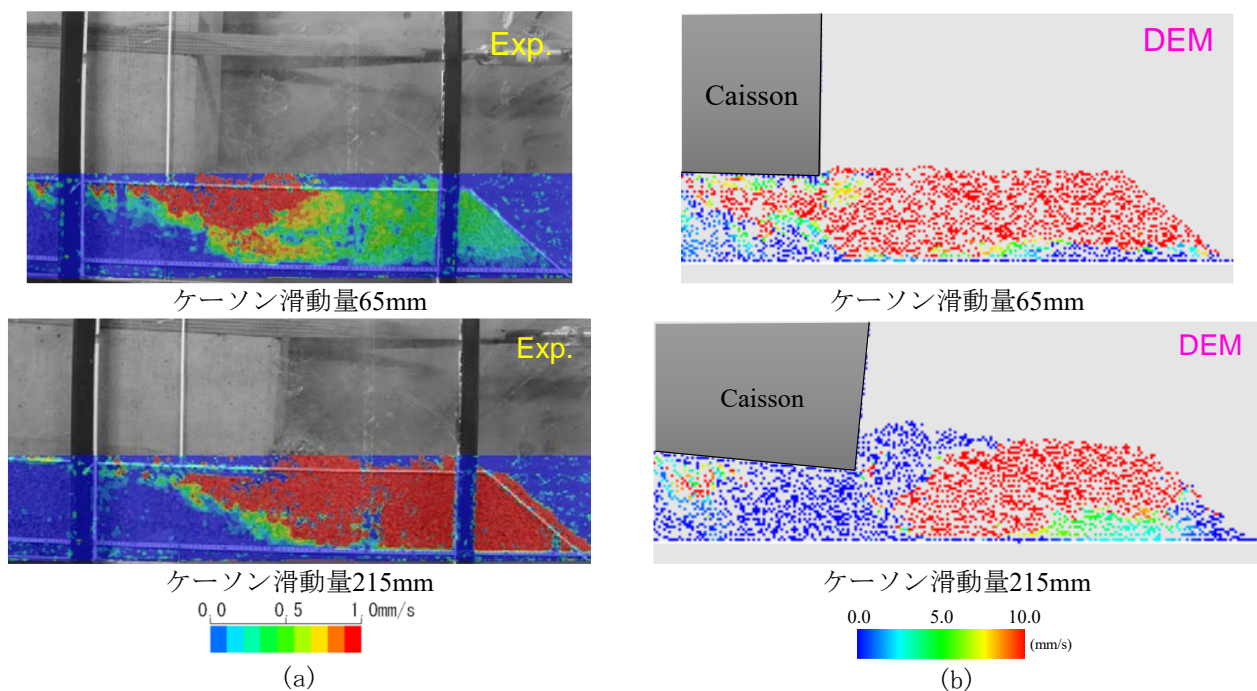


図-26 マウンドの変形：(a) 模型実験における変形速度分布；(b) DEM解析における変形速度分布

最大無次元水平荷重到達したのち、低下に転じると捨石マウンドの変状領域が拡大するとともに、速度が全体的に大きくなる傾向が見られる。ケーソン底面から伸びている変状は底面境界まで発生しているが、ケーソン滑動量65 mmの時点ではすべり塊と底面との境界近傍において変形速度を持っていない領域が確認できる。すなわち、捨石と底面境界の摩擦によりすべりに対する抵抗力が働いたため、水平変位が増大しても水平荷重を維持した状態が継続していると推察される。この抵抗が喪失すると大変形が生じると考える。

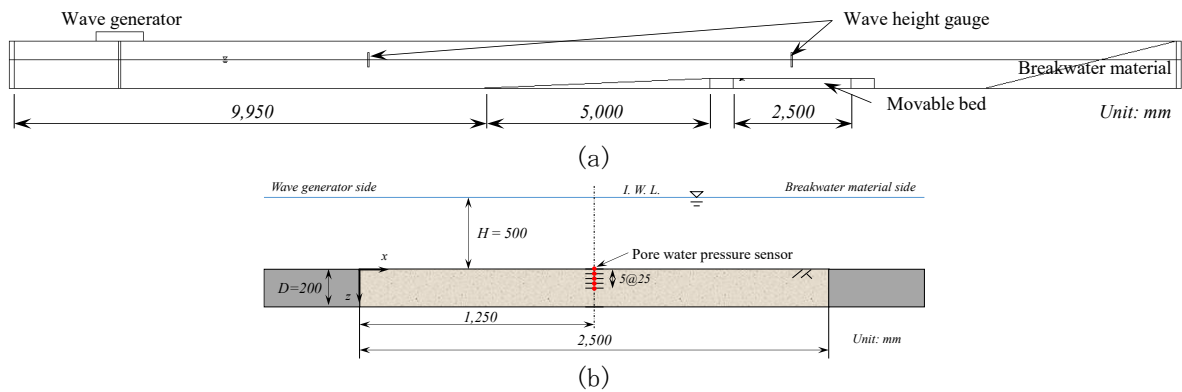
このように、模型実験と数値実験を組み合わせれば、検討ケースのバリエーションが増えるとともに、両者を補完しながらより詳細なメカニズム分析が可能となる。

### (3) 波動と地盤の相互作用を対象とした水理模型実験

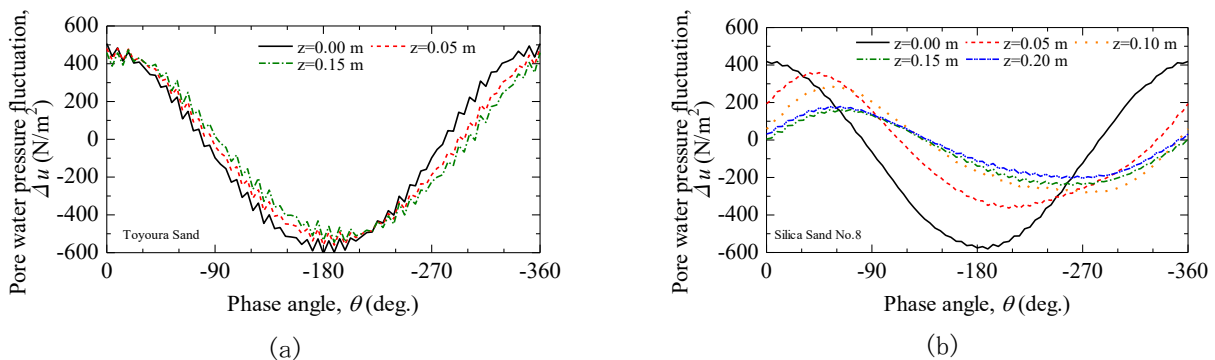
水理学と関連する地盤模型実験として、波浪と地盤の相互作用を検討した研究（例えば、Sassa and Sekiguchi<sup>3.21)</sup>、松田ら<sup>3.22)</sup>）や津波による防波堤の安定問題に関する研究（例えば、三宅ら<sup>3.23)</sup>、高橋ら<sup>3.24)</sup>）が挙げられる。前者について松田らの研究を、後者について三宅らの研究を紹介する。

#### a) 波浪と地盤の相互作用を検討した研究例

波浪により海底地盤に発生する過剰間隙水圧として、変動成分と残留成分がある。前者は海底地盤面に波浪の繰り返し波圧が作用する際、地盤深度方向への水圧伝播の位相差や減衰による変動水圧が発生すると考えられており、砂地盤では変動水圧によって発生した浸透力により地盤の有効応力が低下する。松田ら<sup>3.22)</sup>は、重力場造波水路実験により2つの異なる地盤材料を用いて波浪による地盤の水圧応答を検討した。地盤材料については、想定する実物に近い豊浦砂 ( $D_{50} = 0.17 \text{ mm}$ ) と実物に対して次式で示すDean Number<sup>2.24)</sup>を適用した珪砂8号 ( $D_{50} = 0.09 \text{ mm}$ ) とした。



図－27 造波水路概略図(a)と移動床領域の概略図(b)



図－28 波浪载荷による地盤内の間隙水圧変動：(a)豊浦砂；(b)珪砂8号

$$\{w/(H/T)\}_p = \{w/(H/T)\}_m \quad (4)$$

ここで、 $H$ は波高、 $T$ は波の周期、 $w$ は土粒子の沈降速度であり、下添え字の $p$ はprototype、 $m$ はmodelを示している。図-27に実験水路概略図を示す。実験縮尺は1/25とし、海岸波動<sup>3,26)</sup>を参考に水深 $h = 0.4$  mのもと、波高 $H = 0.12$  m、周期 $T = 1.6$  sの規則波を20分間载荷した。

図-28(a)に豊浦砂、図-28(b)に珪砂8号の波浪場における各々の地盤内の水圧変動を示す。本データは実験開始5分以降で繰返し定常状態となる約60秒間(37周期分)のデータを用いて平均化し、1周期分のデータに変換した数値を示している。豊浦砂では地盤深度方向において若干の水圧伝播の位相差と水圧減衰が生じるのに対し、珪砂8号では地盤深度方向に対し、水圧の減衰が生じているとともに、水圧伝播の位相差が生じていることが明らかとなった。このように、平均粒径が約0.1 mm程度とわずかな違いであるにもかかわらず、地盤内の水圧応答に差が生じることは大変興味深いと考える。

### b) 津波による防波堤の安定問題に関する研究例

津波による構造物へ作用する波圧特性や津波流による海底地盤の侵食に関する研究はこれまで多く行われているが、地盤を含む海岸・港湾構造物の安定性検討は相似則の制限が大きいため十分な検討が行われていない。三宅ら<sup>3,23)</sup>は実地盤の挙動を再現するため土の自重による応力～ひずみ～強度の関係を考慮した遠心力場での防波堤実験を実施した。本実験の特徴は、ドラム型と呼ばれる遠心力装置(図-29(a))を用いており、ゲート急開方式の津波発生装置の導入により、津波の水位変動特性や波圧特性を遠心力場で再現した

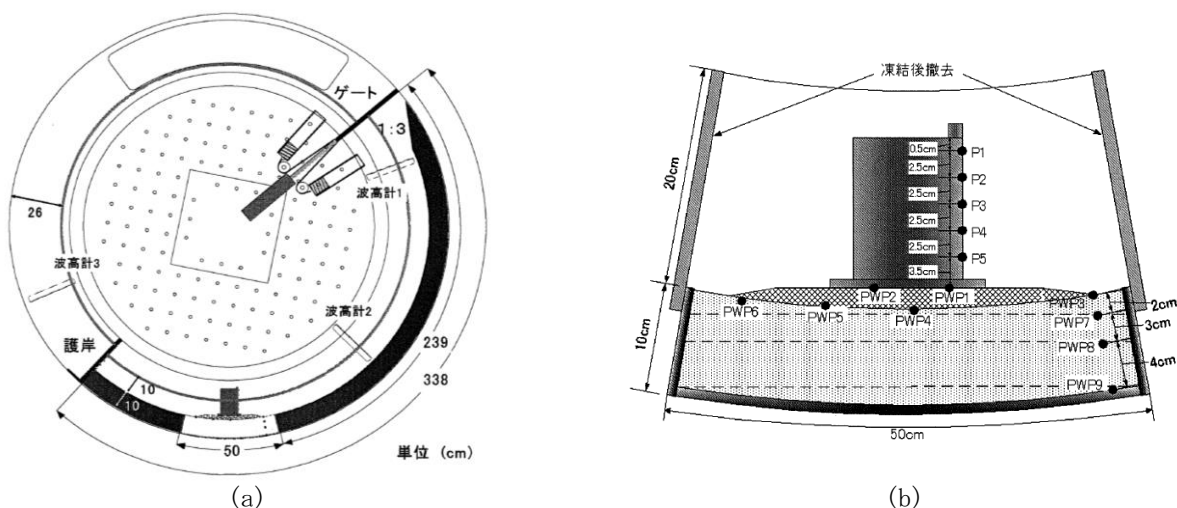


図-29 ドラム型遠心力载荷装置(a)と防波堤実験における実験土槽と模型および計測機器の配置図(b)

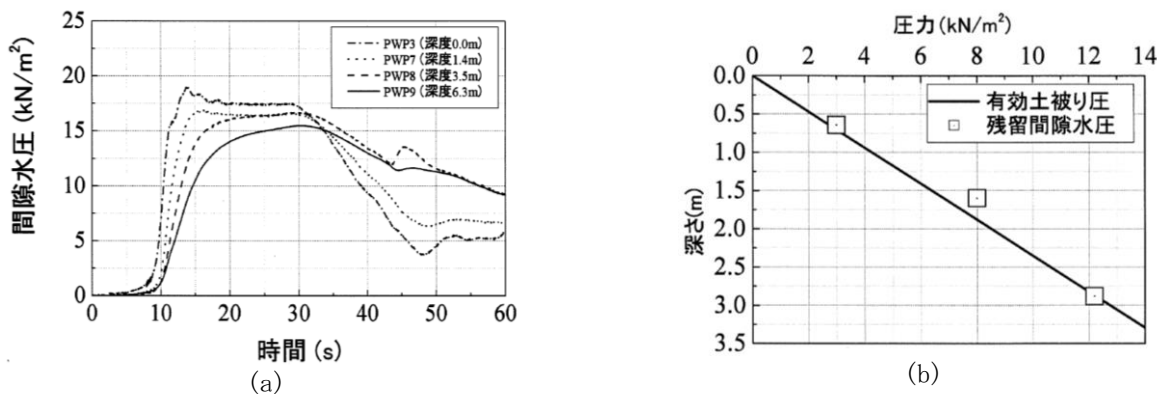


図-30 防波堤実験における港外側の地盤内過剰間隙水圧(a)および地盤有効土被り圧と残留間隙水圧(b)

ことである。防波堤実験（図－29（b））では、津波発生装置を用いて、重量調整したアルミ製ケーソン模型、捨石マウンドには中間粒径2.9 mmの礫材、支持地盤には相対密度40%の豊浦砂でモデル化を行い、津波に対する防波堤構造の安定性の検討が行われた。

防波堤実験の結果として、図－30（a）に防波堤実験時の港外側の地盤内過剰間隙水圧および（b）に港外側の地盤有効土被り圧と残留間隙水圧を示す。図－30（a）より実験開始10秒前後～30秒付近までの押し波が作用する際は地盤深度に伴い間隙水圧の減少が見られるが、その後、引き波に転じて水位低下する際には地盤内に残留水圧が発生し、防波堤の支持地盤内の有効応力が失われることが示された（図－30（b））。また、捨石マウンド内に生じる水圧差からマウンド内の流速が大きくなることを示唆し、捨石は移動する現象を観察することに成功している。

#### 4. おわりに

本稿では、海岸工学および地盤工学における実験論について述べた。特に、これから実験に携わる方々にとって有益な情報を提供できるように心掛けた。より詳細な内容は書籍「水理模型実験の理論と応用」に記載があるので、是非ともご一読頂きたい。読者の皆様にとって実験を行う上での一助になれば幸いである。

波動と地盤の相互作用を対象とした問題については両分野の融合が必要不可欠である。これまで培われてきた分野ごとの知識や技術を礎に、今後もディスカッションを重ね、新たな学問領域の創出や水域における学術的・技術的課題のブレイクスルーに繋がりたいと強く望んでいる。

#### 参考文献

- 1.1) 地盤工学会: 地盤工学における模型実験入門, 丸善, 165p., 1994.
- 2.1) 榎木亨: 環境圏の新しい海岸工学, フジ・テクノシステム, 1999.
- 2.2) Hudson, R.Y.: Reliability of Rubble-mound Breakwater Stability Models, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1975.
- 2.3) 長谷川巖, 有川太郎: 近年における水理模型実験施設の変遷, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I\_349-I\_354, 2019.
- 2.4) 合田良美, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24p., 1976.
- 2.5) Frigaard, R., Christensen, M.: An Absorbing Wave-Maker Based on Digital Filters, Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.168-180, 1994.
- 2.6) 合田良実: 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 2008.
- 2.7) 谷本勝利, 高橋重雄, 吉本靖俊: 衝撃応答波形からの外力推定法について, 港湾技研資料, No. 474, 24p., 1983.
- 2.8) 三井順, 松本朗, 半沢稔, 灘岡和夫: 防波堤港内側マウンド被覆材の津波越流に対する安定性照査方法の提案, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I\_956-I\_960, 2013.
- 2.9) 田中真史, 松本朗, 半沢稔: 没水型長周期波対策工の消波特性に関する実験的検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I\_816-I\_821, 2012.
- 3.1) 地盤工学会: 地盤工学における模型実験入門, 丸善, 165p., 1994.
- 3.2) 五十嵐保, 杉山均: 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, pp. 10, 共立出版, 2013.
- 3.3) 江守一郎, 斉藤孝三, 関本孝三: 模型実験の理論と応用 [第三版], pp. 17, 技報堂出版, 2000.
- 3.4) 岡村未対, 竹村次朗, 上野勝利: 講座-遠心模型実験—実験技術と実務への応用— 2 遠心模型の相似則実験技術—利点と限界, 地盤工学会, 土と基礎, 52(10), pp. 37-44, 2004.
- 3.5) Rocha, M.: The possibility of solving soil mechanics problems by the use of models, Proceeding of the 4th

- International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), Vol. 1, pp. 183-188, 1957.
- 3.6) Phillips, Edouard : De l'équilibre des solides elastiques semblables, 68, C. R. Acad. Sci., Paris, pp. 75-79, 1869.
- 3.7) 土木学会海岸工学委員会 水理模型実験における地盤材料の取扱方法に関する研究小委員会水理模型実験: 水理模型実験の理論と応用—波動と地盤の相互作用—. 土木学会, 188p., 2021.
- 3.8) 石原研而: 第2版 土質力学, 丸善出版, p.27, 2001.
- 3.9) Rad, N.S. and Tumay, M.T.: Factors affecting sand specimen preparation by raining, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 10, Issue 1, pp. 31-37, 1987.
- 3.10) Takahashi, H., Kitazume, M., Ishibashi, S., and Yamawaki, S.: Evaluating the saturation of model ground by P-wave velocity and modelling of models for a liquefaction study, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 6, Issue 1, pp. 13-25, 2006.
- 3.11) Okamura, M. and Inoue, T.: Preparation of fully saturated models for liquefaction study, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 12, Issue 1, pp. 39-46, 2012.
- 3.12) Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K. and Kimura, Y.: Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, *Proc. IS-NAGOYA*, pp. 133-138, 1997.
- 3.13) 龍岡文夫, 森本励, 谷和夫, 大嶋康孝, 岡原美知夫, 高木章次, 森浩樹, 龍田昌毅: 砂地盤の支持力問題におけるせん断強度・実験値・設計計算式の関係, 第34回土質工学シンポジウム発表講演集, pp. 17-22, 1989.
- 3.14) 龍岡文夫, 田中忠次, 岡原美知夫, Siddiquee, Mohamed S.A.: 模型実験・材料実験・数値解析による砂地盤上の帯基礎の支持力の研究, *地盤工学会, 土と基礎*, 40 (5), pp. 11-16, 1992.
- 3.15) 松田達也, 上田竜也, 田村謙太郎, 内藤直人, 栗原直範, 前田健一: ケーソン—捨石構造の破壊モードに着目した重力場における模型実験でのモデリング・オブ・モデルズ, *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, Vol. 77, No. 2, pp. I\_769-I\_774, 2021.
- 3.16) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也: 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, *土木学会論文集C (地圏工学)*, Vol. 67, No. 4, pp. 474-487, 2011.
- 3.17) 松田達也, 田村謙太郎, 上田竜也, 内藤直人: 個別要素法による防波堤の単調載荷解析, 第66回理論応用力学講演会予稿集, 2022.
- 3.18) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 3.19) Fukumoto, Y.: Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials, *Doctor Dissertation*, Kyoto University, 2015.
- 3.20) 公益社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (中巻), pp. 927-928, 2018.
- 3.21) Sassa, S. and Sekiguchi, H.: Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Géotechnique*, 49(5), pp. 621-638, 1999.
- 3.22) 松田達也, 三浦均也, 佐藤隼可, 諫山恭平, 澤田弥生: Dean Numberを適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答, *土木学会論文集 B2*, Vol. 73, No. 2, pp. I\_1117-I\_1122, 2017.
- 3.23) 三宅達夫, 角田紘子, 前田健一, 坂井宏隆, 今瀬達也: 津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用, *海洋開発論文集*, Vol. 25, pp. 87-92, 2009.
- 3.24) Takahashi, H., Sassa, S., Morikawa, Y., Takano, D., and Maruyama, K.: Stability of caisson-type breakwater foundation under tsunami-induced seepage, *Soils and Foundations*, 54(4), pp. 789-805, 2014.
- 3.25) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, *Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf zone*, pp. 208-214, 1973.
- 3.26) 土木学会: 海岸波動—波・構造物・地盤の相互作用の解析法, pp. 481-483, 1994.