

# 波・地盤・構造物の新しい実験手法

馬場慎太郎\*・三宅達夫\*\*・金夏永\*\*\*・鶴ヶ崎和博\*\*\*\*

波浪や潮位変動による洗掘や吸出しは、波・地盤・構造物の複雑な相互作用により発生する。これらの現象を模型実験により検討する場合、発生させる波浪荷重やそれに対する地盤・構造物の応答の双方で相似則を成立させることが重要であるが、同時に困難な問題でもあった。本研究では、この相互作用問題に対して力学的相似則を満足しうる遠心力場で、広い実験スペースを確保できるドラム型遠心装置を用いて波浪実験を行う手法を開発した。以下では、実験装置やその手法について報告し、あわせて本実験手法による波浪実験による砂地盤内間隙水圧応答について紹介する。

## 1. はじめに

海岸構造物周辺における洗掘や吸出し、波浪による構造物の沈下などの現象は、構造物の健全性や安全性を維持する上で、重要な問題である。これまで水理模型実験による護岸背面土砂の吸出しに関する研究（高橋ら、1996）や振動流装置を用いて、模型地盤に圧力変動を与え地盤応答を調べる実験（名合ら、1991）などが行われてきた。しかし、これらの実験は、1 G 場における実験であるため、地盤材料の強度変形特性、透水性などの、力学的相似則を満足させることは困難であった。この問題に対して、Sekiguchi ら（1995）は、1/N 縮尺の模型に対して N 倍の重力加速度を作用させる遠心力場において、粘性流体を用いることで水・土双方の相似則が満足される波浪実験を行った。しかし、関口らのビーム型遠心装置では実験領域に、厳しい制約があるため、応用的発展には限界がある。

本研究では、護岸背面吸出し、波浪による構造物の沈下、法先の洗掘などの問題を、周辺地盤を含む構造物全体系として評価するため、大きな実験領域を確保できるドラム型遠心装置と遠心力場用造波装置および波浪・構造物・地盤をモデル化する波浪実験手法を開発した。

## 2. 遠心力場波浪実験における相似則

遠心力場における波浪伝播に関する時間的相似則は、Sassa・Sekiguchi（1999）により、以下のように示されている。

式（1）は、波長  $L$ 、周期  $T$  の波浪伝播を  $NG$  遠心力場で縮尺  $1/N$  で実施する場合の波の分散関係である。

$$\omega_m^2 = Ng\kappa_m \cdot \tanh(\kappa_m h_m) \cdots \cdots (1)$$

ただし、 $\omega_m$  は振動数、 $\kappa_m (=N\kappa_p)$  は波数  $2\pi/L_m$ 、 $h_m$  は水深、添字  $p$  は実物、 $m$  は模型を示す。 $\kappa_h$  は無次元なので、振動数  $\omega_m$  は式（2）のようになる。

\* 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 地盤環境研究室  
\*\* 正会員 工博 東洋建設(株)鳴尾研究所  
\*\*\* 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 土質研究室  
\*\*\*\* 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 地盤環境研究室

$$\omega_m = \omega_p \sqrt{N(\kappa_m/\kappa_p)} = N\omega_p \cdots \cdots (2)$$

一方、Sassa らは部分排水条件下で、波浪伝播に起因する繰返しせん断を受ける飽和砂地盤の過剰間隙水圧蓄積過程を支配する基礎式として式（3）を導いた。

$$\frac{\partial u_e}{\partial(\omega t)} = \frac{K}{m_v \cdot \mu \cdot \omega} \cdot \kappa^2 \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial(\kappa z)^2} + \frac{1}{m_v} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial(\omega t)} \cdots \cdots (3)$$

ただし、 $u_e$ ：残留過剰間隙水圧、 $\epsilon_v$ ：繰返しせん断による体積ひずみ、 $K$ ：絶対透水系数、 $\mu$ ：動粘性係数、 $m_v$ ：土の体積圧縮係数、 $z$ ：地盤内の鉛直方向深さである。

式は、規則波 1 周期当りの残留水圧蓄積成分についての関係を示している。各微分項は無次元化されているため、土の圧縮係数  $m_v$  および絶対透水系数  $K$  が模型と実物で同じと仮定できる場合、地盤圧密に関する時間的相似則を満足するには、式（4）が成立することが必要となる。

$$\mu_m \cdot \omega_m / \kappa_m^2 = \mu_p \cdot \omega_p / \kappa_p^2 \cdots \cdots (4)$$

ここで、波浪伝播に関する時間的相似則に従い式（2）、および  $\kappa_m = N\kappa_p$  を考慮すると、遠心力場波浪実験で用いる流体の粘性係数に関する相似則が式（5）のように導かれる。

$$\mu_m = N\mu_p \cdots \cdots (5)$$

このような粘性スケージングの導入により、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則の双方を同時に満足することができる。

土質材料に力学的相似則を表-1 に示す。

表-1 相似則

|        | 原型       | NG 遠心力場<br>(縮尺 1/N) | 1 G 場<br>(縮尺 1/N) |
|--------|----------|---------------------|-------------------|
| 縮尺比    | 1        | 1/N                 | 1/N               |
| 間隙比    | $u'$     | $u'$                | $u'/N$            |
| 応力     | $\sigma$ | $\sigma$            | $\sigma/N$        |
| 材料の圧縮性 | $1/m_v$  | $1/m_v$             | $N/m_v$           |
| 流体の粘性  | $\mu$    | $N\mu$              | $\sqrt{N}\mu$     |

### 3. 実験装置および実験手法

#### 3.1 実験装置の概要

##### (a) ドラム型遠心装置

ドラム型遠心装置は、直径 2.2 m、円周 6.7 m、深さ 0.3 m、幅 0.3 m および 0.8 m の円形容器として利用し、最大で遠心加速度 440 G を作用させられる装置である。装置の開発過程・性能については、三宅ら (2002) が詳細を示している。ここでは、本研究を行うために新たに開発した点を挙げる。

##### ① 断面可視化容器

本装置では、100 G を超える高加速度場でありながら、通常の水利模型実験の感覚で実験を観察しようとの発想から、図-1 に示すような断面可視化容器を製作した。これまでのドラム型遠心装置はその規模が小さく、観測用設備を設ける空間が確保できないために、実験状況を水利模型実験のように、側面から観察しようとする発想はなかった。またドラム型遠心装置で波浪・地盤・構造物の相互作用問題に取り組む考えも極めて斬新なアイデアである。観測窓は長さ 120 cm、幅 20 cm で厚さ 40 mm の強化プラスチックからできている。窓上方に CCD カメラを設置し、実験状況を観察・録画可能となっている。

また、図-2 に示すように、造波装置と模型地盤間に海底床を設置している。

##### ② ツールテーブル

ツールテーブルは、図-2 に示すような造波装置やビデオカメラアンプ等の装置類を搭載するための直径 1.5 m の円盤で、容器の内側に設置する。ドラム型遠心装置の特徴は、容器部分とテーブル部分がツインシャフト構造により独立して回転できる点にあるが、今回は造波装置を設置するため両シャフトを完全に同期させた状態で運転した。ツールテーブル上には、水位管理のための超音波計、温度管理計測のための熱電対、波高計のアンプ、

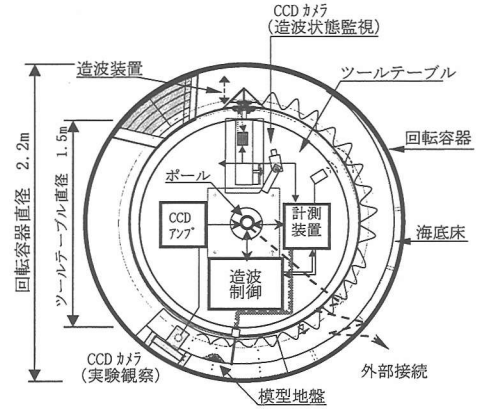


図-2 遠心力場造波装置

流体供給用の樋、照明装置などを配置している。また、制御・計測用の電気信号および動力用電気はセンター部分のポールに取り付けた 2 台のスリッパリングを介して、回転中でも外部と接続された形となっている。

##### (b) 造波装置

造波装置の概念図を図-3、性能諸元を表-2 に示す。造波形式はプランジャー形式で先端にフロートを装着する。プランジャー形式を選択した理由は、構造形式が比較的シンプルなため厳しい遠心加速度下でも、安定した運転が可能であることによる。性能としては、100 G の場合で最大 20 Hz で稼動する。これは、実物換算で周期 5 s に対応し、4.0 cm 程度（実物換算 4.0 m）の波を発生させる。フロートの運転状況は、レーザー変位計により計

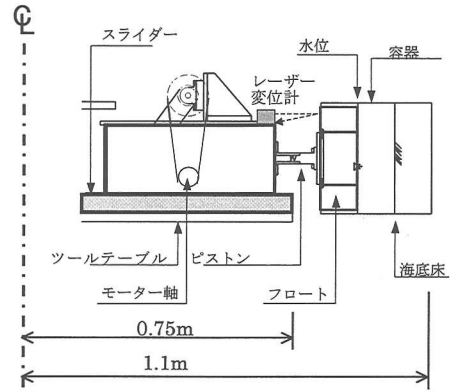


図-3 造波装置

表-2 性能諸元

|       |                  |
|-------|------------------|
| 造波形式  | プランジャータイプ        |
| ストローク | 最大：10 cm         |
| 周波数   | 最大：20 Hz (100 G) |

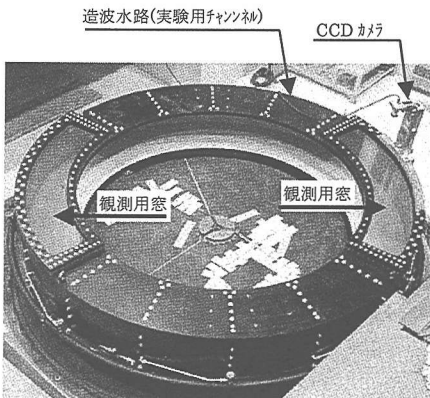


図-1 断面可視化容器

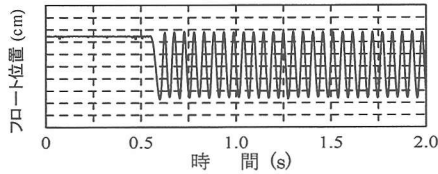


図-4 フロートの応答

測している。  
100 G、20 Hz での計測データを図-4 に示す。

(c) 模型地盤土槽

模型用土槽は実構造物規模の実験に対応するため、図-4 に示すような長さ 1.2 m、幅 30 cm 高さ 30 cm の形状で製作した。砂質土を用いる実験では、この土槽に模型地盤を作成、凍結させた後に、土槽ごとドラム容器に装着する手法を用いている。凍結時には土槽の側板にアルミ板を用いて容器の膨張を防ぎ、実験前に片側の板を強化プラスチックの板に替えることで、実験中の断面観察を可能にしている。

3.2 実験手法

(a) 遠心力場波浪実験手法の概要

実験の手順を以下に示す。1) 試料の相対密度を事前に設定する。今回は豊浦砂 (相対密度 60%) を用いた。密

度管理のため、模型断面を同心円状にブロック割し、各容積対する試料を準備し、試料を均等にまきだす。この時にに間隙水圧計を飽和させた状態で埋め込む。2) 冷凍庫に土槽を入れ、脱気流体で通水する。通水後に温度管理をしながら 3～5 日間で凍結させる。3) 凍結土槽をドラム容器にセットした後、ドラム型遠心装置をスタートさせ、図-6 のように流体を容器内へ供給する。熱電対で温度を監視し、融解状況および、粘性流体の粘度を確認する。4) ドラム回転数を段階的に上げ遠心加速度 100 G の状態にする。7) ドラム排水管につながるスタンドパイプを操作し、水位調節し、所定の周波数で波浪を発生させる。周波数を変え実験した後、水位を変えて同じ操作を繰り返す。

(b) 実験ケース

本研究では、ドラム型遠心装置を用いた遠心力場での水路実験の特性を把握するため、表-3 に示すような条件で実験を行った。

(c) 模型断面および計測項目

実験における計測器配置を、図-7 に示す。計測には直径 8 mm の超小型間隙水圧計を使用した。間隙水圧計は水中部分は土槽側板への埋込み型とし、海底面から 30、60、90 mm 上の位置に、地盤内部に関しては、海底面と海底面下 40、70、95 mm の位置に設置した。波高計は、水理実験に使用されている容量式波高計を模型地盤に 2 箇所設置した。また、造波装置付近の波高も併せて計測した。模型地盤は層厚 100 mm に統一し表-4 に地盤材料の諸元を示す。

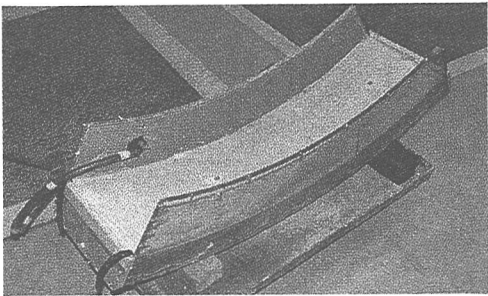


図-5 模型地盤土槽

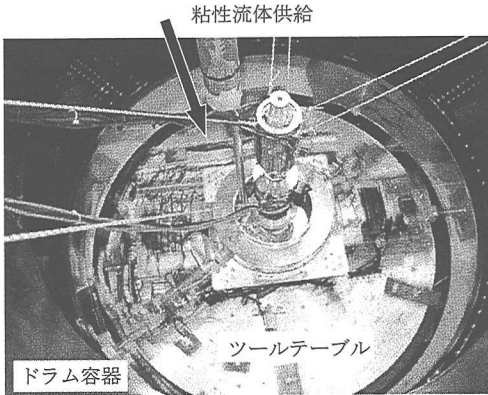


図-6 粘性流体供給状況

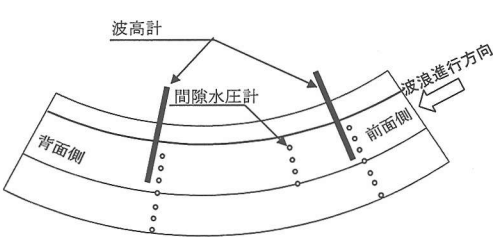


図-7 模型と計測器設置

表-4 地盤材料の諸元

| 材 料 | 相対密度       | 粒 径                     |
|-----|------------|-------------------------|
| 豊浦砂 | $D_r=60\%$ | $d_{50}=0.17\text{ mm}$ |

表-3 実験ケース

| 模型地盤 | 流体   | 水深<br>(実物水深)       | 周波数<br>(実物周期)      |
|------|------|--------------------|--------------------|
| 移動床  | 粘性流体 | 130 mm<br>(13.0 m) | 20.0 Hz<br>(5.0 s) |

## 4. 波浪载荷時の砂地盤内間隙水圧応答

### 4.1 解析手順

実験において得られた地盤内の間隙水圧応答について、実験条件にあわせた数値波動水路 (CADMAS-SURF) と地盤 FEM 解析 (Kim ら, 2002) を組み合わせた解析を行い、実験結果との比較を行った。解析は以下の手順で行った。

(1) 数値波動水路により、模型地盤部分に作用する波浪を解析した。造波装置と模型地盤の間には、実スケールで 270 m の海底床を設置しており、海底床部分の波浪変形を考慮に入れたモデル化を行った。解析モデルを図-8 に示す。解析には入力パラメータとして、造波装置部分で発生させる波高が必要となるため、造波装置部分における波高を計測した。得られた波形を図-9 に示す。これより、造波装置において発生する波浪を周期 5 s、波高 3.5 m と設定した。

(2) 数値波動水路計算結果により得られた、海底面における変動水圧値を、荷重データとして弾塑性地盤 FEM 解析に取り込み地盤内の間隙水圧応答を計算する。用いた解析コードは、繰返し载荷によるせん断変形およびそれに伴う間隙水圧の蓄積を評価可能な弾塑性構成則を用いている。解析条件は次のように設定した。水境界条件は、模型地盤にあわせて側面および底面を非排水境界とし、荷重条件は図-10 に示すように、海底面

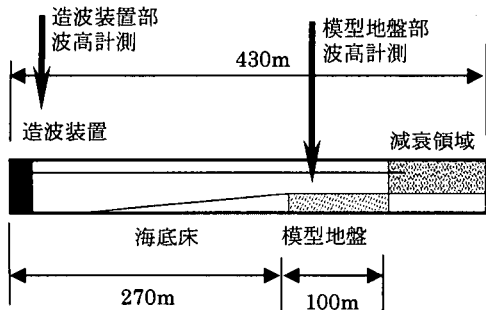


図-8 数値波動水路解析モデル

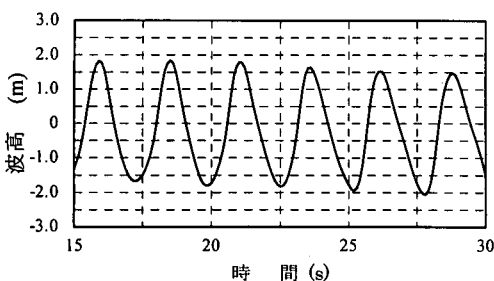


図-9 造波装置による発生波高

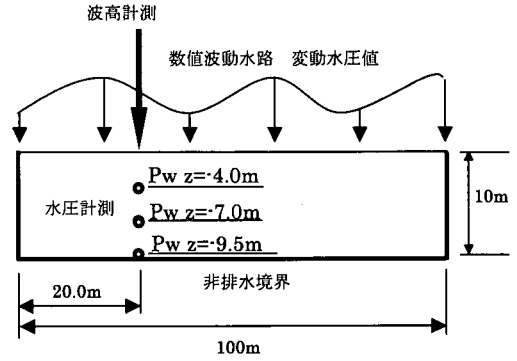


図-10 地盤 FEM 解析モデル

表-5 構成モデルパラメータ

| $M_o$ | $M_r$ | $\alpha$ | $\beta_o$ | $\beta_i$ | HO  | HuO (kPa) | $\gamma_u$ |
|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----|-----------|------------|
| 1.2   | 0.87  | 0.35     | 4.0       | 0.2       | 700 | 8000      | 4          |

の要素に対応した数値波動水路の差分格子の水圧値を 0.01 s 刻みで荷重ステップとして入力した。

解析地盤の初期応力は、豊浦砂（相対密度 60%）の水の中単位体積重量 ( $9.2 \text{ kN/m}^3$ ) を用いて、各層の有効土被り圧を求め、透水係数は文献より  $0.015 \text{ cm/cm}$  とした。弾塑性パラメータについては、既往の文献 (Kim ら, 2002) から決定した。表-5 に解析に用いた構成モデルパラメータを示す。実験結果と比較を行う点は図-10 に示すように、波高計と間隙水圧計の双方が設置してある地点である。

### 4.2 実験結果と解析結果の比較

実験による波高計測結果と数値波動水路計算による波形を図-11 に示す。比較は、模型地盤部分において波形が安定する造波開始後 60 s 付近の値について行なっている。グラフから両者が良く一致していることがわかる。造波時に 3.5 m であった波高は、海底床を伝播する段階で減衰して模型地盤部分に到達する段階では 2.5 m 程度の波高となっている。

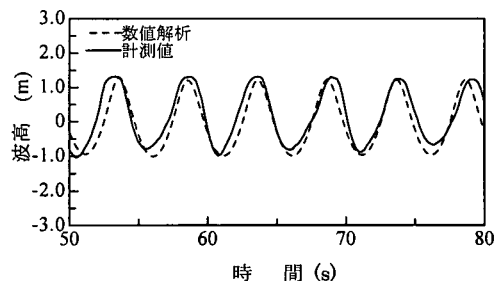


図-11 波形データの比較

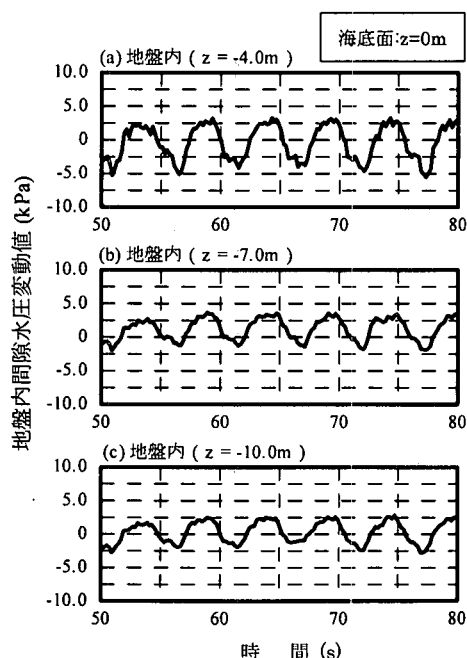


図-12 地盤内の間隙水圧変動

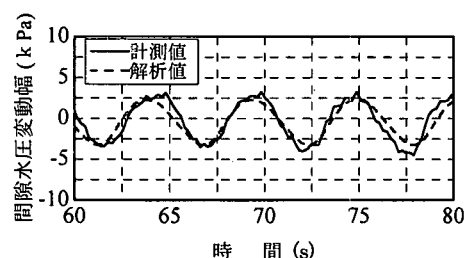


図-13 間隙水圧変動値の比較 (実験・解析)

実験における地盤内の水圧変動値を図-12に示す。地盤深度が深くなるにつれて、変動幅が低減していることが分かる。

図-12の $z = -4.0\text{m}$ 地点について、実験と解析結果を比較したグラフを図-13に示す。両者の波形が良く一致していることが分かる。また、各深度における変動幅を整理したものを図-14に示す。解析は、ある深度から一定値となる結果を示している。実験値は $-7.0\text{m}$ 地点が若干異なるものの、他の2点ではほぼ等しくなっており、減衰する傾向も良く一致するといえる。

## 5. ま と め

### ① 波浪・地盤・構造物の相互作用を実断面規模で検

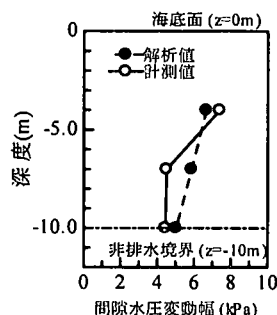


図-14 地盤深度と変動幅

討するため、ドラム型遠心装置を用いた遠心力場波浪実験手法を開発した。

② 実験装置・手法の検証のため、豊浦砂の水平模型地盤(長さ120 cm, 厚10 cm, 幅30 cm, 1/100縮尺)において、粘性流体を用いた波浪実験を行った。

③ 実験と同等の条件で、数値波動水路と地盤FEM解析を組み合わせた解析を行い地盤内の間隙水圧応答をシミュレートした。その結果両者は良く一致し、ドラム型遠心装置を水路として利用する遠心力場波浪実験法の有用性が示された。

## 参 考 文 献

- 沿岸開発技術センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー No. 12.
- 関口秀雄 (1994): 遠心力場重複波実験による砂質地盤の間隙水圧応答, 土質工学シンポジウム論文集, 第39回, pp. 29-36.
- 高橋重雄・鈴木高二郎・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・菅 功企・山崎浩之 (1996): 護岸の吸出しに関する水理模型実験, 港研報告, 11巻, 3号, pp. 92-104.
- 鶴ヶ崎和博・三宅達夫・馬場慎太郎・金 夏永 (2002): 波浪が護岸背面地盤へ及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 776-780.
- 名合宏之・前野詩朗・西岡 操 (1991): 変動水圧による構造物の沈下機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 826-830.
- 三宅達夫・柳畑 亨 (1999): ドラム型遠心装置による直投土砂の堆積形状予測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 971-975.
- Kim, H. and H. Sekiguchi (2002): Plastic deformation behaviour of composite breakwaters under earthquake shaking, ICPMG 2002 (in printing).
- Miyake, M., T. Yanagihata, S. Baba and K. Tsurugasaki (2002): A large-scale drum type centrifuge facilities and its application, ICPMG 2002 (in printing).
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, Geotechnique 49, no. 5, pp. 621-638.
- Sekiguchi, H., K. Kita and O. Okamoto (1995): Response of poro-elastoplastic beds to standing waves, Soils and Foundations vol. 35, no. 3, pp. 31-42.