

波動と地盤の相互 作用について考える

～ 第1章 出版にあたり ～

東洋建設株式会社

小竹 康夫

2

発表内容

1. 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について
2. 本書で取り扱う内容
3. 本書の構成（目次の紹介）
4. お読みの際に留意頂きたいこと

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 海洋工学委員会
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

3

『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』について

1. 小委員会の設置目的：

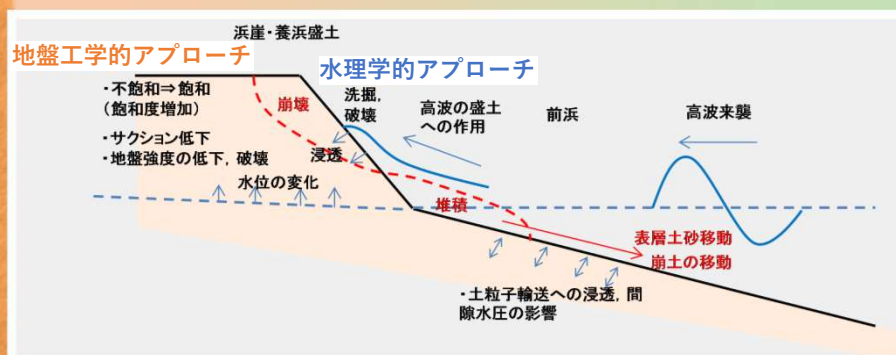
水理学分野と地盤工学分野の研究者において**相似則を含めた**実験の整合性および結果の取り扱いに対する**共通認識**

 - ①各分野既往研究における地盤材料の取り扱いレビュー
 - ②相似則の整合性や、実験結果を現地換算する際の留意点整理
 - ③水理模型実験における**地盤材料の取り扱い方法**について一定の方向性を示す
2. 組織体制：合計24名（水15，地9／産8，学12，官4）
3. 設置期間：第1期2016～（水谷法美(名大)委員長）
 第2期2018～（荒木進歩(阪大)委員長）
 第3期2019.6～2021.6（有川太郎(中大)委員長）
 ★2021.6から**研究会**として活動を開始

4

本書で取り扱う内容

流体（波動）と地盤の複合場における相互作用が影響する現象



5

本書の構成（目次の紹介）

1. はじめに
2. **模型実験**の方法論
 - 2.1 実験の目的
 - 2.2 水理模型実験
 - 2.3 地盤模型実験
 - 2.4 地盤材料の取扱いに関するレビューと課題の整理
3. **模型実験**における**相似則**の**考え方**
 - 3.1 相似則の役割
 - 3.2 流体の相似則
 - 3.3 地盤の相似則
 - 3.4 流体と地盤の複合実験の相似則
4. **模型実験**の**ケーススタディ**
 - 4.1 ケーススタディの着眼点
 - 4.2 ケース① 消波ブロック下部の洗掘現象
 - 4.3 ケース② 養浜盛土の侵食
5. **波浪・地盤****数値計算**の方法論
 - 5.1 数値計算の役割
 - 5.2 流体と地盤の統一解法の発展
 - 5.3 流体と地盤の遷移領域の取扱い
 - 5.4 粒子法による底質土砂輸送
 - 5.5 格子法による地盤の波浪応答
6. 今後の課題

6

お読みの際に留意頂きたいこと

記号の使い方について

水理学（あるいは海岸工学）と地盤工学の各々の分野で歴史的に**同じパラメータを異なる記号**で表現している場合が多々ある。そのために本書においては、できるだけ**本文中の近い箇所で記号の説明**をするように心がけています、同じ記号でも章や節によっては、異なるパラメータを指している場合があることに注意してください。

7

お読みの際に留意頂きたいこと

主要な相似則と対応する無次元数について

相似則と無次元数の表記を使い分けています

主要な相似則		対応する無次元数	
(本書での表記)	流体場で使用する場面	名称 (英語表記)	定義
フルード則	重力が支配的な現象	フルード数 (Froude Number)	慣性力と重力の比
レイノルズ則	粘性が支配的な現象	レイノルズ数 (Reynolds Number)	慣性力と粘性力の比

8

お読みの際に留意頂きたいこと

流体と地盤の複合場における主要な相似則について

主要な無次元数 (英語表記)	定義	複合場で使用する場面
シールドズ数 (Shields Number)	海底面に作用するせん断力（底面摩擦応力）と底質の静的なせん断抵抗の比	海底面に作用する流体のせん断力による砂粒子の移動
ディーン数 (Dean Number)	粒子に働く力（水平方向の波力）と重力（鉛直方向の力）の比	漂砂や洗掘において砂粒子の沈降を伴う地形変化

ご清聴
ありがとうございました

END

波動と地盤の 相互作用について考える

～ 第2章 模型実験の方法論 ～

株式会社不動テトラ 久保田 真一
豊橋技術科学大学 松田 達也

「第2章 模型実験の方法論」 に関する概要説明

- 2.1 実験の目的（久保田・松田）
 - 2.2 水理模型実験（久保田・長谷川：ゲスト執筆）
 - 2.3 地盤模型実験（澤田・高橋・飛田・松田）
 - 2.4 地盤材料の取扱いに関するレビューと課題の整理
（久保田・中村・松田）
- 編集事務局・校正担当（緒方）
クロスチェック（荒木・池野・佐々・鈴木崇・宮本）

※敬称略

【コンセプト】

これから実験を実施される方々にとって
有益な情報が得られるように！

「第2章 模型実験の方法論」 に関する概要説明

2.1 実験の目的

2.2 水理模型実験

- 2.2.1 模型実験の計画
- 2.2.2 模型実験の分類と対象
- 2.2.3 計測対象と計測方法
- 2.2.4 模型実験の手順
- 2.2.5 代表的な模型実験例

2.3 地盤模型実験

- 2.3.1 模型実験の計画
- 2.3.2 模型実験の分類と対象
- 2.3.3 計測対象と計測方法
- 2.3.4 模型実験の手順
- 2.3.5 代表的な模型実験例

2.4 地盤材料の取扱いに関するレビューと課題の整理

- 2.4.1 水理模型実験における移動床実験を取り扱った既往の実験例
- 2.4.2 水理模型実験における地盤材料の取扱いに関する課題の抽出と整理

水理模型実験と地盤模型実験において、
項のタイトルを統一

これまで実施されてきた模型実験について

- 目的に応じた実験の分類
- 実験の方法・手順
- 実験で使用する主な計測機器と計測方法

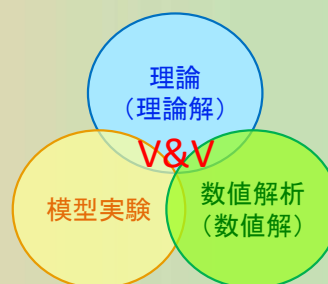
を中心に分野ごとに体系化された模型実験の
キホンについて実験例を交えて説明。

2.1 実験の目的

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。

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。

海岸工学分野・地盤工学分野における
これまでの**模型実験に関する経緯（歴史）**を説明。



2.2 水理模型実験

2.2.1 模型実験の計画

2.2.2 模型実験の分類と対象

2.2.3 計測対象と計測方法

2.2.4 模型実験の手順

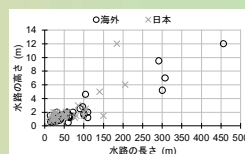
2.2.5 代表的な模型実験例

(1) 模型縮尺の設定

- 使用する水槽の大きさ、造波能力や計測値の信頼性確保の観点より縮尺を設定
- 相似則の観点からの検討も必要

(2) 実験施設

- 断面水槽・平面水槽
- 造波装置の種類と機能



断面水槽のイメージ (左) と国内外の断面水槽の規模 (右)

2.2 水理模型実験

2.2.1 模型実験の計画

2.2.2 模型実験の分類と対象

2.2.3 計測対象と計測方法

2.2.4 模型実験の手順

2.2.5 代表的な模型実験例

波高計を例に

容量式波高計やサーボ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。…

波高計のキャリブレーションでは、観測対象となる波高が計測できるよう、水槽内に水を入れた状態で、波高計を上下に移動させて行う。…

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。…



容量式波高計の設置例

2.2 水理模型実験

2.2.1 模型実験の計画

2.2.2 模型実験の分類と対象

2.2.3 計測対象と計測方法

2.2.4 模型実験の手順

2.2.5 代表的な模型実験例

実験を実施し、結果を適切に読み解くための、**詳細な実験手順**と**適切なデータ処理方法**について解説。また、波浪外力を適切に再現するための**通過波検定**方法についても詳細に説明。

波高計を例に

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。ただし、水深が小さい地点や砕波帯内などでは、ゼロダウンクロス法が用いられることもある。

代表的な模型実験例

- (1) 構造物（ケーソン）に作用する波力実験
- (2) 消波ブロックの安定実験

2.3 地盤模型実験

2.3.1 模型実験の計画

2.3.2 模型実験の分類と対象

2.3.3 計測対象と計測方法

2.3.4 模型実験の手順

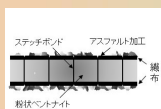
2.3.5 代表的な模型実験例

重力場および**遠心力場**における**実験方法**について、これまでどのような実験が実施されてきたのか、具体的な事例を紹介しながら解説。

重力場模型実験



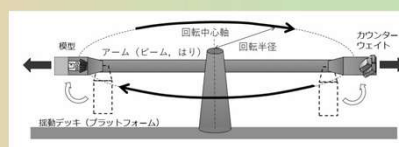
剛性が極めて低い管の埋設時の変形挙動



補強型GCL (シート)

複雑な施工過程の再現、複雑な構造を有した対策工の再現を例に、実験方法の長所と短所を解説。

遠心力場模型実験



なぜ、遠心力場での実験が必要なのか、実験の歴史から始まり、原理・実験方法を踏まえ長所と短所を解説。

2.3 地盤模型実験

2.3.1 模型実験の計画

2.3.2 模型実験の分類と対象

境界の設定, 模型地盤の作製方法, 計測機器の取り扱い等を中心に説明. 特に, 模型地盤の作製方法については詳細に解説.

2.3.3 計測対象と計測方法

2.3.4 模型実験の手順

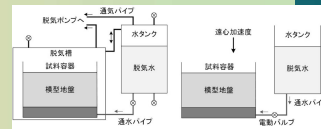
2.3.5 代表的な模型実験例

砂地盤の作製方法
 相対密度の調整
 飽和度の管理

- 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



砂ホッパーの例



地盤の飽和方法

2.3 地盤模型実験

2.3.1 模型実験の計画

2.3.2 模型実験の分類と対象

砂地盤における支持力問題を対象とした静的模型実験, 地震応答実験における重力模型実験と遠心力模型実験の比較に関する既往の研究論文を参照しながら解説.

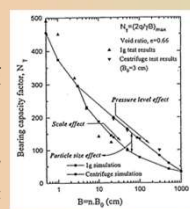
2.3.3 計測対象と計測方法

2.3.4 模型実験の手順

2.3.5 代表的な模型実験例

静的模型実験

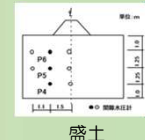
帯基礎等の支持力問題に関する重力場と遠心力場の模型実験を比較した研究レビューを行い, 圧力効果と粒子スケール効果による寸法効果が及ぼす影響について説明.



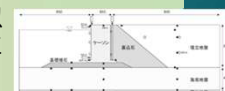
帯基礎の支持力問題に関する寸法効果

動的模型実験

土構造物・構造物—地盤の複合問題に対する重力場と遠心力場の実験比較が行われている研究レビューを行い, 相似則と現象の再現性について説明.



盛土



重力式岸壁

2.4 地盤材料の取扱いに関するレビューと課題の整理

2.4.1 水理模型実験における移動床実験を取り扱った既往の実験例

2.4.2 水理模型実験における地盤材料の取扱いに関する課題の抽出と整理

1. 波動－地盤の複合問題に関する模型実験
2. 波動－構造物－地盤の複合問題に関する模型実験

- 対象とする現象・対象構造物
- 実験種別（重力場・遠心力場）
- 実験縮尺
- 地盤材料（決定の根拠，工夫）

表 2.4.3 波動－構造物－地盤の相互作用に関する既往の実験事例

著者	対象構造物	実験縮尺	地盤材料	地盤材料決定の根拠・工夫など
入江ら 2436	防波堤	1/75	中央粒径 0.14 mm の砂	観の位置に堆積が生じる L タイプとなるように決定 同上
		1/50	中央粒径 0.07 mm の砂	
梅沢ら 2429	消波ブロック 被覆堤	1/75	中央粒径 0.16 mm の砂	漂砂の移動形態の相似を考え、 実物スケールで中央粒径 1 mm に相当する砂を使用
高橋ら 2438	ケーソン式 護岸	1/20	10%粒径 0.13 mm、空隙率 0.445、湿潤密度 1.90 g/cm ³ 、 実質部分 2.70 g/cm ³ の砂	砂層内部での圧力減衰が小さく 現れる可能性を指摘
金谷ら 2427	直立堤	1/30	平均粒径 0.15 m、比重 2.66、 均等係数 1.88、最大間隙比 1.023、 最小間隙比 0.595 の砂	砂地盤の透水係数の相似が概ね 満足していることを確認

2.4 地盤材料の取扱いに関するレビューと課題の整理

2.4.1 水理模型実験における移動床実験を取り扱った既往の実験例

2.4.2 水理模型実験における地盤材料の取扱いに関する課題の抽出と整理

- 移動床に用いられる地盤材料は想定する現地の地盤材料と同等の粒径の材料が用いられることが多いが、実現象との整合性が不明確である。
 - シールズ数に着目して人工真珠等の比重が軽い材料を用いる工夫がなされているが、実現象との整合性が不明確である。
 - 基本的には中央粒径（または、平均粒径）のみが相似パラメータとして適用されており、地盤材料特性が十分考慮されている訳ではない。
- ✓ 洗掘、侵食、吸出し等の作用に伴う進行速度や地形が均衡状態に至るまでの時間の相似性
 - ✓ 構造物の安定問題を対象とした場合の支持力破壊等、地盤工学的視点
 - ✓ 海浜変形や護岸の安定性問題等における不飽和地盤の特性を考慮

第3章 模型実験における相似則の考え方

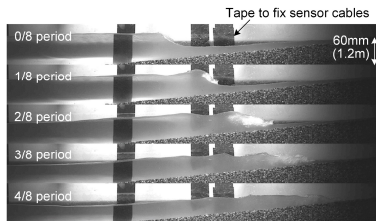
3.1 相似則の役割

3.2 流体の相似則

3.3 地盤の相似則

3.4 流体と地盤の複合実験の相似則

➡ 発展途上（研究中）



Takahashi et al.: Centrifuge modelling of breaking waves and seashore ground, 2019.

相似則 模型で起きる現象と実物で起きる現象との関係を表す法則が「相似則」

相似比 実物と模型の物理量の比

方法1 現象に関する物理量を全て列挙し、 Buckinghamのπ定理を用いて無次元量を定め、実物と模型の無次元量を等しくする方法

方法2 現象に関する重要な力（慣性力、粘着力、弾性力、摩擦力など）を列挙し、相互の比によって無次元量を求めて、実物と模型の無次元量を等しくする方法

方法3 現象を支配する方程式から無次元量を求めたり、直接的に物理量の相似比を求めたりする方法

1

流体の相似則

ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + g \mathbf{e}_g \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t'} + (\mathbf{v}' \cdot \nabla') \mathbf{v}' = -\nabla' p' + \frac{\nu}{vL} \nabla'^2 \mathbf{v}' + \frac{gL}{v^2} \mathbf{e}_g$$

$\mathbf{v}' = \mathbf{v}/v$ などと置き換えると

現象を支配する
無次元量

$$R_e = \frac{vL}{\nu} \quad F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

相似比（流体）

	長さ	時間	速度	加速度	質量	圧力	力
実物	1	1	1	1	1	1	1
模型	1/N	1/√N	1/√N	1	(1/N) ³	1/N	(1/N) ³

重力場の実験

	長さ	時間	速度	加速度	質量	圧力	力
実物	1	1	1	1	1	1	1
模型	1/N	1/N	1	N	(1/N) ³	1	(1/N) ²

遠心力場の実験

2

地盤の相似則 (1)

- 有効応力の定義

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + m\boldsymbol{p}$$

- ひずみの定義

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = -Ld\boldsymbol{u}$$

- 土の構成則 (クリープ変形や温度変化等に伴うひずみを無視した)

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D}d\boldsymbol{\varepsilon}$$

- 土の運動方程式 (土骨格に対する間隙水の相対加速度を無視した (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{p} formulation))

$$-L^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \boldsymbol{g} = \rho \ddot{\boldsymbol{u}}$$

- 間隙水の運動方程式

$$-\nabla p + \rho_f \boldsymbol{g} = \frac{\rho_f g}{k} \dot{\boldsymbol{w}} + \rho_f \ddot{\boldsymbol{u}}$$

- 間隙水の連続式 (水、土粒子自体の体積変化を無視した)

$$\nabla^T \dot{\boldsymbol{w}} - m^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = 0$$

$[\boldsymbol{\sigma}]_p / [\boldsymbol{\sigma}]_m = \lambda_{\sigma}$, $[\boldsymbol{\sigma}']_p / [\boldsymbol{\sigma}']_m = \lambda_{\sigma'}$, $[p]_p / [p]_m = \lambda_p$ などを代入して相似比を決定する。

一般的な相似比 (地盤)

物理量	説明	相似比
\boldsymbol{x}	長さ (寸法)	λ
ρ	飽和土の密度	λ_ρ
$\boldsymbol{\varepsilon}$	ひずみ	λ_ε
\boldsymbol{g}	重力加速度	λ_g
t	時間	$(\lambda \lambda_\varepsilon / \lambda_g)^{0.5}$
$\boldsymbol{\sigma}$	全応力	$\lambda \lambda_\rho \lambda_g$
$\boldsymbol{\sigma}'$	有効応力	$\lambda \lambda_\rho \lambda_g$
\boldsymbol{D}	接線剛性	$\lambda \lambda_\rho \lambda_g / \lambda_\varepsilon$
p	間隙水圧	$\lambda \lambda_\rho \lambda_g$
k	透水係数	$(\lambda \lambda_\varepsilon \lambda_g)^{0.5}$
\boldsymbol{u}	土骨格の変位	$\lambda \lambda_\varepsilon$
$\dot{\boldsymbol{u}}$	土骨格の速度	$(\lambda \lambda_\varepsilon \lambda_g)^{0.5}$
$\ddot{\boldsymbol{u}}$	土骨格の加速度	λ_g
\boldsymbol{w}	土骨格に対する水の変位	$\lambda \lambda_\varepsilon$
$\dot{\boldsymbol{w}}$	土骨格に対する水の速度	$(\lambda \lambda_\varepsilon \lambda_g)^{0.5}$
ρ_f	間隙水の密度	λ_ρ

3

地盤の相似則 (2)

相似比 (地盤)

物理量	説明	相似比	
		重力場	遠心力場
\boldsymbol{x}	長さ (寸法)	λ	λ
ρ	飽和土の密度	1	1
$\boldsymbol{\varepsilon}$	ひずみ	$\lambda^{0.5}$	1
\boldsymbol{g}	重力加速度	1	$1/\lambda$
t	時間	$\lambda^{0.75}$	λ
$\boldsymbol{\sigma}$	全応力	λ	1
$\boldsymbol{\sigma}'$	有効応力	λ	1
\boldsymbol{D}	接線剛性	$\lambda^{0.5}$	1
p	間隙水圧	λ	1
k	透水係数	$\lambda^{0.75}$	1
\boldsymbol{u}	土骨格の変位	$\lambda^{1.5}$	λ
$\dot{\boldsymbol{u}}$	土骨格の速度	$\lambda^{0.75}$	1
$\ddot{\boldsymbol{u}}$	土骨格の加速度	1	$1/\lambda$
\boldsymbol{w}	土骨格に対する水の変位	$\lambda^{1.5}$	λ
$\dot{\boldsymbol{w}}$	土骨格に対する水の速度	$\lambda^{0.75}$	1
ρ_f	間隙水の密度	1	1

相似比 (間隙に水, 遠心力場)

物理量	説明	相似比
k	透水係数	$1/\lambda$
t	時間	λ^2
$\dot{\boldsymbol{w}}$	土骨格に対する水の速度	$1/\lambda$

重力場の実験

間隙に水を用いると、透水 (排水) の相似比が基本方程式から導かれるものと一致しない。ただし、模型がある程度大きいこともあり、あまり気にせず実験が行われている。

遠心力場の実験

静的実験：透水 (排水) 以外に時間が問題になる現象が少なく、水を使用して基本方程式から導かれる時間の相似比を使わず、独立した時間の相似比を使う場合が多い。

動的实验：振動と透水 (排水) の時間の相似比を合わせるために粘性流体を用いることが多い。



粘性流体の例
信越化学工業ウェブサイトより

4

流体と地盤の複合実験の相似則 (1)

底面摩擦係数

$$\tau_0 = \rho f' \frac{v^2}{2}$$

フルード則なら
重力場: $1/\sqrt{N}$
遠心力場: 1

摩擦係数

$$f' = \frac{2gn^2}{R^{1/3}} = \frac{2g}{R^{1/3}} \left(\frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \right)^2 \cong 0.0341 \left(\frac{k_s}{R} \right)^{1/3}$$

$$f' = 0.47 \left(\frac{k_s}{a_\delta} \right)^{3/4}$$

相似比 (掃流力)

物理量	説明	相似比	
		重力場	遠心力場
L	長さ (寸法)	$1/N$	$1/N$
d	土粒子の粒径	$1/M$	$1/M$
ρ	水の密度	1	1
s	土粒子の水中比重	1	1
g	重力加速度	1	N
R	径深	$1/N$	$1/N$
a_δ	水粒子変動の振幅	$1/N$	$1/N$
v	流速	$(1/N)^{1/2}$	1
f'	摩擦係数	$(N/M)^{1/3}$ $(N/M)^{3/4}$	$(N/M)^{1/3}$ $(N/M)^{3/4}$
τ_0	掃流力	$(N/M)^{1/3} \cdot 1/N$ $(N/M)^{3/4} \cdot 1/N$	$(N/M)^{1/3}$ $(N/M)^{3/4}$
u_*	摩擦速度	$(N/M)^{1/6} (1/N)^{1/2}$ $(N/M)^{3/8} (1/N)^{1/2}$	$(N/M)^{1/6}$ $(N/M)^{3/8}$
τ_*	無次元掃流力	$(M/N)^{2/3}$ $(M/N)^{1/4}$	$(M/N)^{2/3}$ $(M/N)^{1/4}$

5

流体と地盤の複合実験の相似則 (2)

沈降速度

$$w_s = \sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1}$$

$$S_* = \frac{d_N}{4\nu} \sqrt{sgd_N}$$

Jimenez & Madsen (2003)

沈降速度の比 (模型/実物)

$$\frac{w_{sm}}{w_{sp}} = \left(\sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1} \right)_m / \left(\sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1} \right)_p$$

相似比 (浮遊による洗掘)

物理量	説明	相似比	
		重力場	遠心力場
L	長さ (寸法)	$1/N$	$1/N$
d	土粒子の粒径	$1/M$	$1/M$
ρ	水の密度	1	1
ν	水の動粘性係数	1	1
g	重力加速度	1	N
H	波高	$1/N$	$1/N$
T	波の周期	$(1/N)^{1/2}$	$1/N$
v	流速	$(1/N)^{1/2}$	1
w_s	沈降速度	w_{sm}/w_{sp}	w_{sm}/w_{sp}

水平流速と土粒子の沈降速度の比を保つには、以下の関係式が満たされる必要がある。

$$\left(\frac{H}{w_s T} \right)_p = \left(\frac{H}{w_s T} \right)_m$$



$$\frac{1}{\sqrt{N}} \quad 1$$

上記の値となるように、粒径などを調整する。

6

流体と地盤の複合実験の相似則（3）

沈降速度

$$w_s = \sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1}$$

$$S_* = \frac{d_N}{4\nu} \sqrt{sgd_N}$$

Jimenez & Madsen (2003)

想定する実物

- 20度の水
- 砂の粒径0.2mm
- 砂の水中比重0.9

実験条件

- 1/16スケール
- 重力場
- 砂の水中比重0.9

実物の沈降速度

$$d_N = d/0.9 = 0.2/0.9 = 0.222 \text{ mm}$$

$$\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$s = 0.9$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

模型の沈降速度

$$d_N = d/0.9 = 0.088/0.9 = 0.0978 \text{ mm}$$

$$\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$s = 0.9$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$S_* = 2.46$$

$$w_s = 1.46 \text{ cm/s}$$

$$\times \frac{1}{4}$$

$$S_* = 0.718$$

$$w_s = 0.363 \text{ cm/s}$$

Dean数を保った実験を実施することができる。

7

流体と地盤の複合実験の相似則のまとめ

境界付近での波と地盤の複合実験

漂砂（当図書で相似比を検討）

掃流による漂砂：無次元掃流力の固定

浮遊による漂砂：Dean数などの固定

土砂流動

粘性流体モデルからの導出

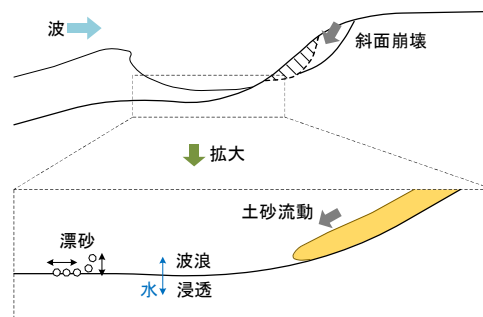
波浪～浸透

Navier-Stokes式からDarcy則への接続式からの導出

広い領域での波と地盤の複合実験

斜面崩壊

従来からの水と土の相似則の適用が可能



8

波動と地盤の相互 作用について考える

～ 第4章 その1 ～

国立研究開発法人 海上・港湾・航
空技術研究所 港湾空港技術研究所
鈴木高二郎

海底の洗掘現象の再現性

- **大規模実験**を様々なスケールの実験で再現
複数の研究機関が実施
(港空研、中央大学、東洋建設、名古屋大学、不動テトラ)
- **砂地盤の相似則**の適用性を明らかにする
沈降速度パラメーター (Dean Number)

消波ブロック下部の洗掘現象

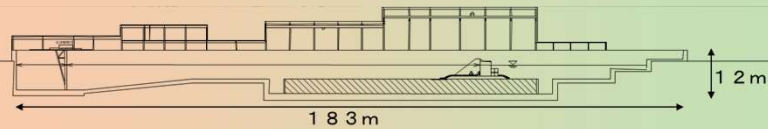
H.8 7/25ブロック設置直後

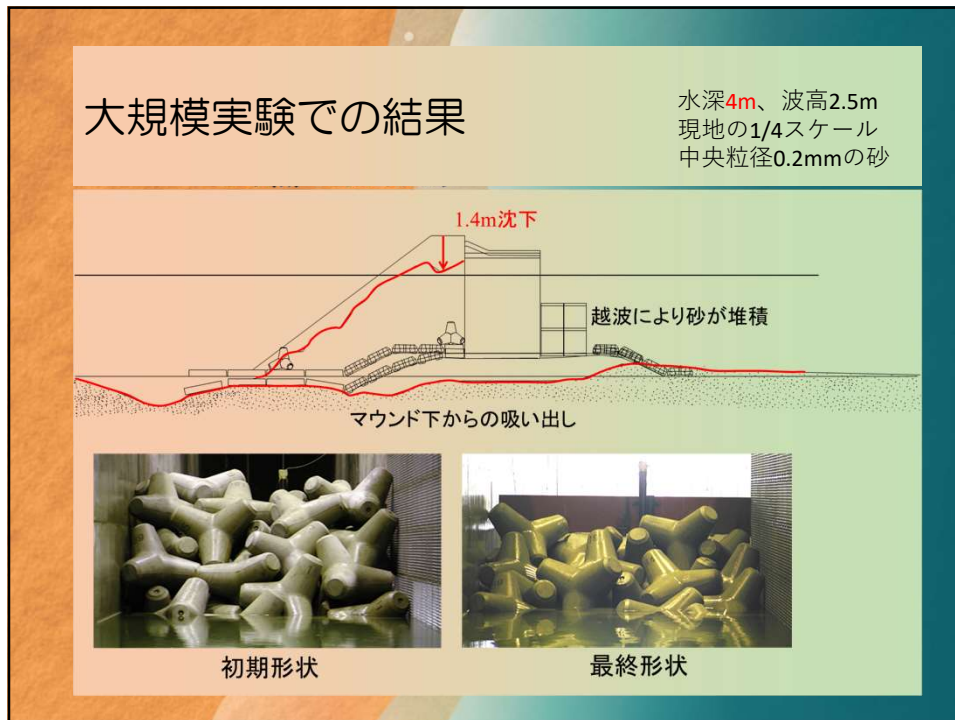


H.8 8/14台風12号通過後

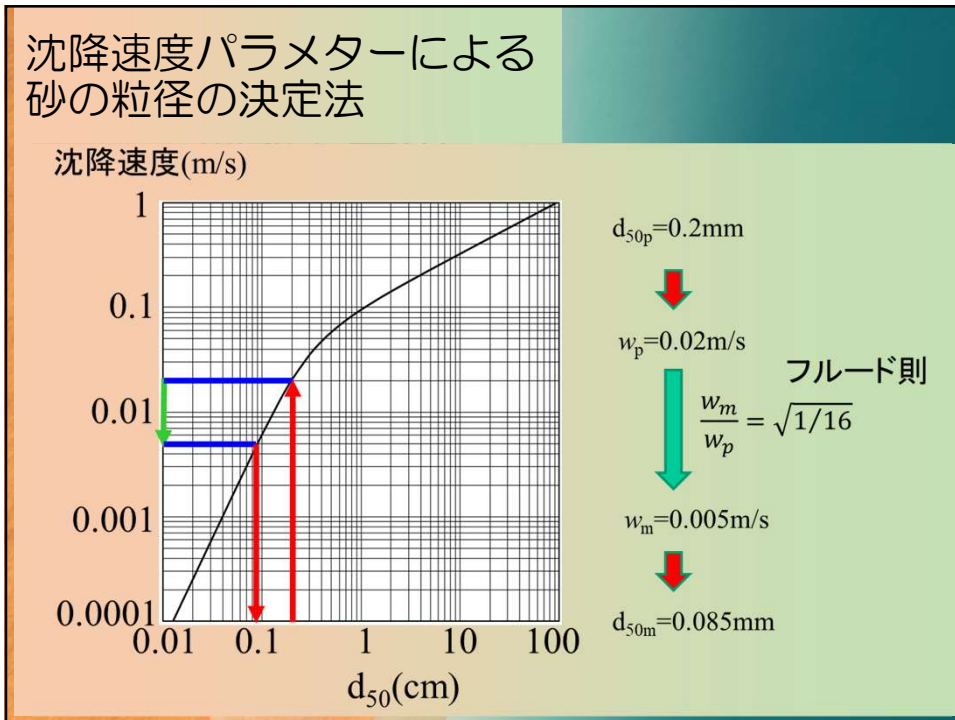


世界最大級の実験水路 大規模波動地盤総合水路





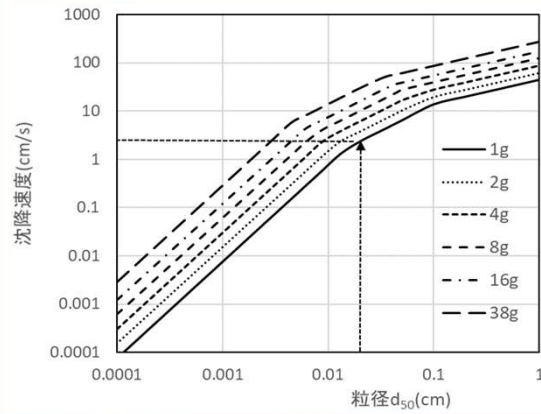
実験条件	重力	対現地	対超大型実験	作用波数	テトラポッド (kg)	マウンド粒径 D_{50} (mm)	砂粒径 d_{50} (mm)	洗掘深 (模型スケール) (mm)	備考
	(g)	(縮尺比)	(縮尺比)						
現地	1	1			64000	425	0.140.2		宮崎港
超大型実験	1	1/4	1	2000	500	73	0.2	750	港空研 4.2.4
大型実験	1	1/16	1/4	3000	4.3	23	0.080.3	0-200	港空研 4.2.3
中小型実験 -機関A-	1	1/55.8	1/14	2000	0.256	10.9	0.15	0	名古屋大学 4.2.5
				100000				45	
中小型実験 -機関B-	1	1/55.8	1/14	3200	0.184	10	0.11	44	不動テトラ 4.2.6
中小型実験 -機関C-	1	1/100	1/25	10000	0.032	4.6	0.11	0	中央大学 4.2.7
遠心力模型 実験 -機関D-	38	1/152	1/38	500	0.032	4.759.5	0.02	36	東洋建設 4.2.8
				500		4.759.5	0.15	0	
				2000		9.519.5	0.15	0	



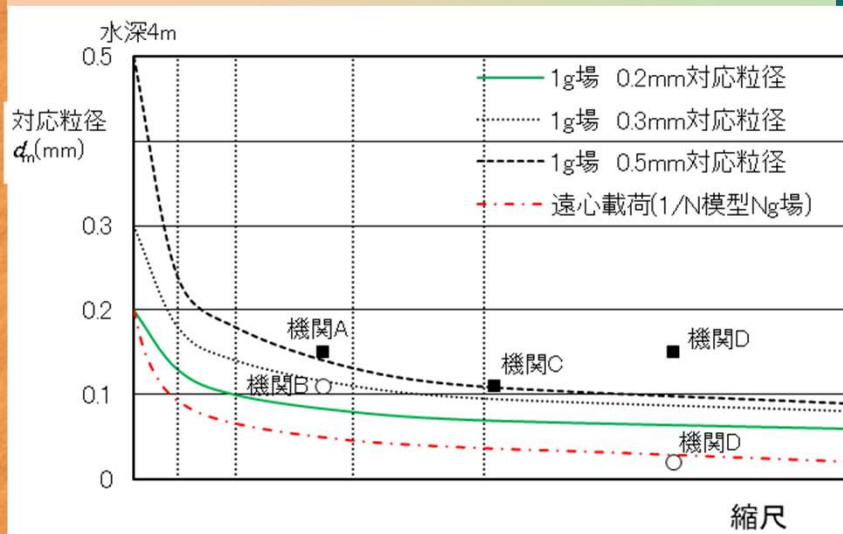
遠心実験の場合

	式(4.2.2)	式(4.2.3)	式(4.2.4)
$A = \frac{\rho' g (d_{50})^3}{\nu^2}$	$A < 39$	$39 < A < 10^4$	$10^4 < A < 3 \cdot 10^6$
w_s	$\frac{\rho' g (d_{50})^2}{18\nu}$	$\frac{(\rho' g)^{0.7} (d_{50})^{1.1}}{6(\nu)^{0.4}}$	$\frac{(\rho' g)^{0.5} (d_{50})^{0.5}}{0.91}$

$g \Rightarrow Ng$



実験結果



まとめ

- ・洗掘形状は沈降速度による相似則（ディーン数）で再現可能なことが明らかとなった。
- ・遠心力模型実験についても、荒木らによりディーン数を基にした洗掘現象の相似則の妥当性が示された。
- ・中小実験では、洗掘形状が大型実験と相似していたものの、洗掘の進行速度は大型実験と比較するとやや遅く、落ち着くまでにより多くの時間を要した。
- ・洗掘形状が再現できるものの、浮遊砂濃度までは相似できていない可能性もあり、その影響が洗掘の進行速度に影響を及ぼしている可能性がある。
- ・マウンド内部の乱れも重要な項目であり、レイノルズ数およびマウンド碎石と砂の粒径比の観点からも大きめの実験が望ましいことが明らかとなった。

その他

- ・レイノルズ数が小さい条件では、抗力が相対的に大きくなり、消波ブロック模型が不安定になる。
- ・越波で堤体背後の水位が上昇するような場合は、ポンプあるいは副水路を用いて堤体背後の水位が上昇しないようにすることが重要。

消波ブロック下部の洗掘現象

実験結果

相似則、浮遊砂現象
Fall Speed

水理模型実験の理論と応用

一波動と地盤の相互作用

Dean Number
Dean(1973,1985)

$$\left\{ \frac{\omega_p}{\omega_m} \right\} = \left\{ \frac{\left(\frac{H}{T} \right)_p}{\left(\frac{H}{T} \right)_m} \right\}$$

フルード則と組み合わせることができる

※Xie(1981)

$$\left\{ \frac{(U_{max} - U_*)}{\omega} \right\}_p = \left\{ \frac{(U_{max} - U_*)}{\omega} \right\}_m$$

Case1

消波工法先
洗掘進行 洗掘深13.5cm
(現地量7.5m)

消波ブロック沈下

Case2

砂層際の洗掘大

マウンド下部の洗掘
4.6cm (現地量2.6m)

ケーソン背後の堆砂

1 G場の実験

高速回転
円筒水路

消波板
半径1.3m
実験水路
地盤
構造物模型

(a) 円筒水路

遠心場の実験

10.5m (4m)
ケーソン
消波ブロック
3.5層の設置
ケーソン
外部流路
かごマナ
径合計
8cm (3.2m)
地盤
構造物模型
消波板
720m(27m)

入力波振幅 $\gamma = 0.2812$
($\gamma = 2.0m$ 振幅)

(b) 吸出し実験模型



4.3 ケース②(養浜盛土の侵食) 国総研海岸研究室 加藤史訓



神向寺海岸(茨城県)



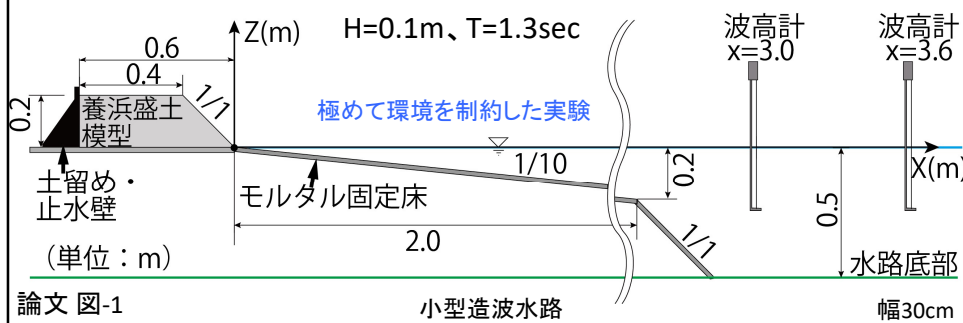
浜松篠原海岸(静岡県)



富士海岸吉原工区

養浜盛土の侵食過程に及ぼす盛土材料の影響に着目して、「前浜地形の耐波侵食性向上に資する砂礫混合養浜手法の検討(野口ら; 2017)」の実験における、造波開始直後の盛土断面の変化を考察する。

水理模型実験のレイアウト



全て移動床としてしまうと
海底地形の変化が養浜盛土の変形に影響する
→海底部分を固定床とする(バー・トラフが形成されない)

養浜盛土は不飽和状態(含水比は測定していない)

実験の相似則

静岡・清水海岸でのトレンチ調査(野口ら、2014)で得られた砂浜の断面構造や底質を参考に、縮尺1/10程度を想定して、波の条件を決定した。

ただし、盛土材料の影響を定性的に把握するため、養浜材の粒径は現地と同程度とした。

静岡・清水海岸

中砂(0.25mm)～中礫(19mm)

エネルギー平均波: 波高1.09m

近年の最大波浪: 波高9.28m、周期16.7秒

実験

中砂(0.4mm)～中礫(10mm)

波高0.10m、周期1.3秒

2

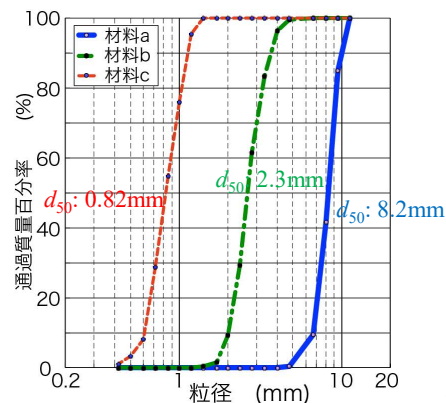
養浜盛土の材料構成

粒度分布が重ならない3つの材料を使用

養浜盛土に含まれる割合(%)	Case							
	1	2	3	4	5	6	7	8
材料 a(中礫)	100	0	0	50	33.3	0	0	13.3
材料 b(細礫)	0	100	0	50	33.3	40	30	13.3
材料 c(砂)	0	0	100	0	33.3	60	70	73.3

海岸近傍の河道内で採取された玉砂利および砂

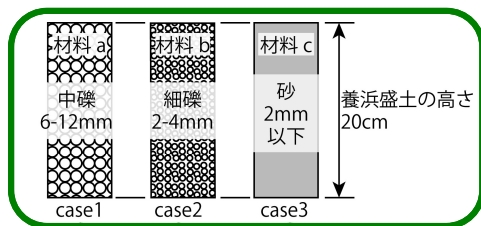
角がない(碎石でない)
扁平な石が混じっている



3

材料の組合せ

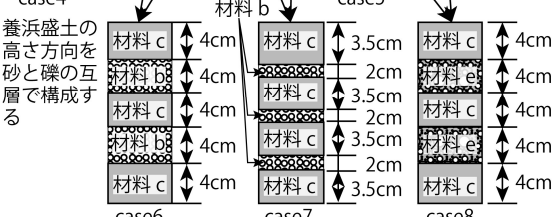
調達した材料



混合した材料



互層で盛土

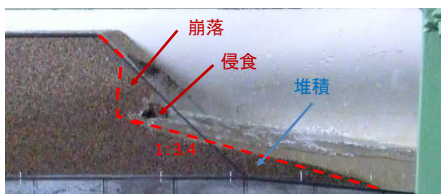


論文 図-4(修正)

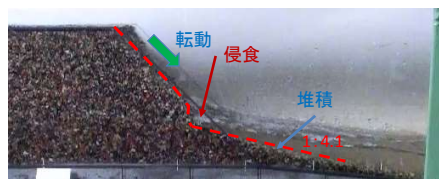
4

盛土法面の急勾配化

○砂だけの盛土(case3)では、盛土法面が切り立つ



Case3(砂)、5分後

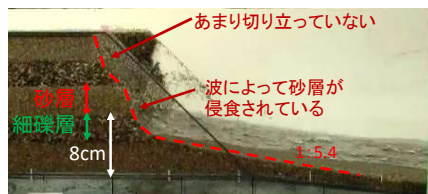


Case2(細砂)、5分後

○砂層を含む互層としたケースのうち、波の遡上高よりやや高い位置に砂層がある盛土(case7)では、その砂層より上部の法面が切り立つ



Case7、15分後



Case6、15分後

5

実験後の盛土部分の侵食状況

Case	底質	浜崖高さ	浜崖勾配	解釈
1	中礫	なし	—	粒径が大きいため侵食されにくい
2	細礫	なし	—	侵食されるが浜崖が形成されない
3	砂	中	ほぼ垂直	サクシオンにより盛土上部が崩落しない
4	中礫:細礫	なし	—	中礫と細礫のかみ合わせにより波の遡上点付近の法面が急になった?
5	中礫:細礫:砂	高	急	case3より盛土上部が崩落している
6	細礫:砂	高	やや緩	サクシオンが小さい細礫層で緩勾配になる
7	細礫:砂	高	急	細礫層が薄いため浜崖が急になる
8	中礫:細礫:砂	中	急	砂が多いため浜崖が急になる

※中礫 (D_{50} : 8.2mm)、細礫 (D_{50} : 2.3mm)、砂 (d_{50} : 0.82mm)

6

砂丘の崩壊機構をふまえた考察

○砂を含む材料で構成された養浜盛土では、切り立った法面が形成されやすい

○砂層と礫層の互層の養浜盛土では、遡上点の上部に砂層があると切り立った法面が形成されやすい

○上記の傾向は、砂層でのサクシオンが礫層より大きく、法面が安定しやすいためと考えられる。

○養浜盛土の侵食に適用すべき相似則は、波と地盤の複合実験の相似則であるが、波の遡上範囲より上部については不飽和地盤の特性を考慮した相似則とする必要がある。

7