

波浪に対する海底地盤の有効応力応答メカニズムの「空き缶モデル」による考察
 Consideration of the mechanism of effective stress response of seabed to wave loading
 by using 'Can Model'

三浦均也¹, 松田達也¹, 藤井湧大², ARIF Daniel bin Aami³

1 豊橋技術科学大学・建築・都市システム学系・k-miura@ace.tut.ac.jp

2 豊橋技術科学大学・建築・都市システム学専攻

3 豊橋技術科学大学・建築・都市システム学課程

概 要

沿岸・沖合構造物が荒天時に波浪を受けることにより過度に沈下して不安定化し、構造物の機能が低下することが問題になっている。海岸工学においては海底地盤に作用する海水の流速による侵食現象で説明されている。一方、地盤工学においては海底地盤を多孔質連続体としてモデル化することによって、波浪によって海底面に作用する水圧変動が地盤内へ伝搬し、その結果として有効応力が周期的に変化することが明らかにされている。このような有効応力の変動を原因とする海底地盤の荷重支持力の周期的な低下が、構造物が不安定化して沈下や転倒する原因の一つであると考えられる。本研究ではそのような有効応力応答のメカニズムにおける地盤条件の重要性について、海底地盤を単純化して得た「空き缶モデル」を用いて考察する。また、広口瓶を用いた机上の模型実験によって、海底地盤の有効応力応答挙動を定性的にはあるが再現できることを示す。

キーワード：海底地盤，波浪荷重，有効応力応答，空き缶モデル，地盤条件

1. はじめに

波浪場における構造物の安定性は、基本的には第一には直接作用する波浪荷重によって検討されるが、構造物を支持する海底地盤の健全性も重要な要素である。明らかに海底地盤の支持力低下が原因とみられる、荒天時における沿岸・沖合構造物の被災事例が数多く報告されている（例えば、西田ら¹⁾, Oka, et al²⁾）。海岸工学分野では海水の流速の関数として生じる、シートフロー、浮遊漂砂、掃流砂などによる底質の移動によって構造物の被災メカニズムを説明している。すなわち、海底地盤における底質移動、それに関連する海底面の変動（洗掘）、構造物の沈下・傾斜・埋没などの現象は専ら流速により検討されてきている。

西田ら¹⁾は本州の日本海側沿岸における継続的に沈下している離岸堤を横断する範囲で実施した地盤探査によって、消波ブロックが埋没するたびに補充してきたことにより、海底地盤内の深さ 10m を超える範囲に消波ブロックが沈下・散乱していることを示した。また、Oka, et al²⁾は北海道太平洋側の漁港において、マウンドを設けずに砂地盤上に直接設置したケーソン式防波堤が、数年間にわたって荒天時における沈下が蓄積し、最大で 1.4m 沈下したことを

を報告している。これらの事例における構造物の沈下・埋没は、流速だけで生じたとは直感的には考えにくい現象であろう。

地盤工学の視点では、海底地盤を連続体と見なして、多孔質弾性体でモデル化することによって可能になる、波浪水圧変動を受ける地盤内の間隙水圧と有効応力に着目した検討が進められてきた。Yamamoto, et al.³⁾, Zen and Yamazaki⁴⁾ は波浪水圧変動を受ける海底地盤内における有効応力の変動に対する解を誘導し、波浪荷重が激しければ周期的に有効応力がゼロになる液状化状態となることを示した。三浦ら⁵⁾は、多孔質弾性体に対して、剛体仮定や非排水条件を含む 4 種類の定式化を示し、動的、疑似動的、静的な解析条件において 1 次元と 2 次元条件で解を誘導し、地盤材料の特性と有効応力応答の関係を考察した。Zen and Yamazaki⁶⁾, 三浦ら⁷⁾, 松田ら⁸⁾ は沿岸における観測や実験室における模型実験で、波浪水圧変動により海底地盤内に有効応力の変動が実際に生じることを示した。さらに筆者ら^{8,9)}は、有効応力変動と流速の関係が底質移動の方向と量を支配することに着目し、これまでに直線構造物と円形構造物の周辺で生じる底質移動と洗掘現象の定量的な計算方法を提案している^{10,11)}。

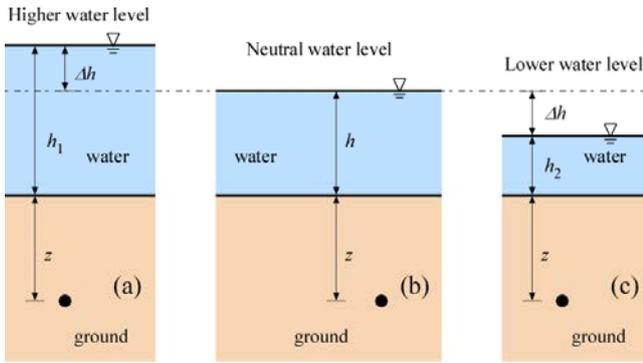


図 1 水位変動による砂地盤内における応力状態の変化；
古典力学では有効応力は変化しない

本稿の目的は、波浪水圧変動を受ける海底地盤の有効応力変動のメカニズムを考察することであり、これによって、地盤工学に軸足を置かない研究者や技術者からしばしばいただく、「有効応力が変動することは確かなのか」、「メカニズムを分かりやすく説明してほしい」「地盤のどのような性質が効いているのか」と言った質問に、合理的なメカニズムを示して答えることである。

最初に、学部で学生が習う古典的な地盤力学では説明できない現象であることを示すことから始める。次に、種々の状態の空き缶を水槽の中において水圧を増減する状態を理想的に考えた、「空き缶モデル」と名付けたモデルを用いて、海底地盤の水圧に対する応答メカニズムを定性的にはあるが考えてみる。それによって、地盤のどのような性質が有効応力応答を支配しているのか検討する。一方、著者らは広口瓶の中に作成した海底地盤模型に水圧変動を与えることによって、有効応力変動する過程で有効応力が低下したときに構造物模型が沈下することを机上の簡易なモデルで示すことを試みた。実験の概要を説明するとともに、発表では動画を用いて説明する。

2. 古典的な地盤力学における考察

2.1 有効応力に関する最初の問題

学部学生が地盤力学を習うとき、おそらくは最初の定期試験において地盤内における全応力や有効応力、間隙水圧の分布について質問されるはずである。図 1 は筆者が必ず出題する問題の一つで、水深が異なる水面下の地盤における有効応力と間隙水圧の意味を問う問題である。図 1 における深さ z の地点の応力状態は以下のようなものである。

$$\begin{aligned}
 \text{(a): } & \sigma_z = (h + \Delta h)\gamma_w + z\gamma_{sat}, \quad p = (h + \Delta h + z)\gamma_w, \quad \sigma_z' = z\gamma' \\
 \text{(b): } & \sigma_z = h\gamma_w + z\gamma_{sat}, \quad p = (h + z)\gamma_w, \quad \sigma_z' = z\gamma' \\
 \text{(c): } & \sigma_z = (h - \Delta h)\gamma_w + z\gamma_{sat}, \quad p = (h - \Delta h + z)\gamma_w, \quad \sigma_z' = z\gamma'
 \end{aligned} \quad (1)$$

全応力 σ_z と間隙水圧 p は水位変動によって変化するが、有効応力は変化しない、したがって、地盤には何の変化も生じない（変形せず、剛性・強度も変化しない）と答えるのが正解である¹²⁾。

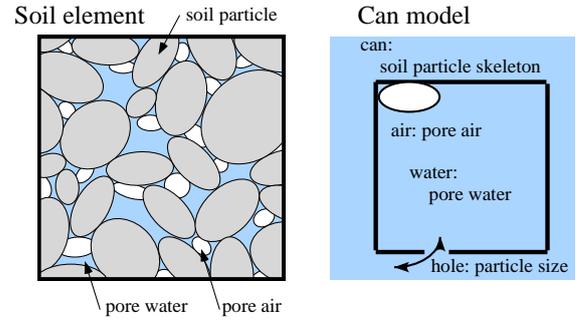


図 2 「空き缶モデル」土要素との対応

2.2 有効応力が変化する条件は

古典的な地盤力学においては、暗黙のうちに静的な平衡状態を対象としているのである。もちろん、粘土地盤の圧密問題では、疑似動的な条件において間隙水圧と有効応力が連動して変化することの重要性を覚える。また、研究や実務においては砂地盤においても地震時（動的条件）においては、非排水条件または圧密を考慮した解析が必要である。しかし、水圧の変動を受けた地盤で有効応力が変化することを理解するのはなかなか難しい。土をいきなり固体と液体、流体からなる多相系の多孔質材料として考えるのは複雑すぎるので、以下では「空き缶」の挙動を想像しながら考察を進める。

3. 「空き缶モデル」を用いた考察

土粒子骨格を空き缶に見立てて、水圧に対する海底地盤の応答を考えてみる。図 2 は土要素と水槽内の「空き缶」の対応を示し、以下のように想定している。

- ・ 土粒子骨格 <<>> 空き缶
- ・ 間隙（水・空気） <<>> 缶内部（水・空気）
- ・ 透水性（土粒子寸法） <<>> 缶の孔の大小
- ・ 全応力 <<>> 缶の外圧（水槽の圧力）
- ・ 間隙水圧 <<>> 缶の内圧
- ・ 有効応力 <<>> 缶の内内外水圧差

空き缶には清涼飲料水の金属製の缶を想定し、水槽内で大気圧の数分の 1 程度の缶の外部水圧変動を受け弾性限度内の変形を生じるものとする。

3.1 空気を封入した「空き缶」は変形する

図 3 は、内側が空気で満たされた空き缶の場合には外から水圧変動を受けると容易に変形することを示している。初期条件では空き缶内外の圧力（空気圧と水圧）は等しいとしているので空き缶の構造にはストレスが無いが、水圧を上昇すると空き缶は収縮し、降下すると膨張する。これは空気の体積圧縮率が大きいため、空き缶が変形して容積が変化しても、内圧（空気圧）の変化はほとんど生じないとみなせるからである。

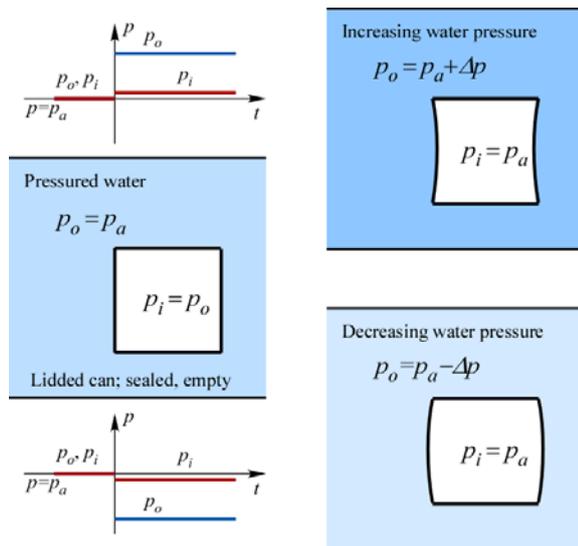


図 3 水圧を受ける空き缶の変形

3.2 蓋のない空き缶は変形しない

図 4 は、蓋を取り去った空き缶が水圧変動を受けるときの挙動を示している。(a)は内部が水で満たされている状態、(b)は空気が容積の半分ほどが占めている状態を示している。水槽の水圧が急激に変動する場合でも、両者においては内圧が瞬時に反応して外圧にすため、内外の圧力差はほとんど生じない。(a)の場合水の体積変化はほとんどない。一方、(b)の場合には空気の体積が目に見えて変化するが、蓋を取り去ったことにより相当する量の水が瞬時に出入りすると考えられる。水圧による金属材料の体積変化は取るに足らないので、空き缶の構造変形は無視できるほど小さいと言える。

空き缶が変形するのは内外の水圧に差が生じるときだけであり、空き缶に蓋が無いような透水性が十分に大きな土（例えば礫材）では、間隙が飽和されているか否かに関わらず、変形が生じないと説明できる。

3.3 密閉された（飽和・不飽和）空き缶の挙動

図 5 は、蓋があり密閉されているが内部が飽和されている空き缶の挙動を示している。水の体積圧縮率は空気や缶構造の体積圧縮率に比べればオーダーが違って小さいと考えられる。したがって、空き缶の内圧は外圧に対して瞬時に追随すると考えられ、この場合も内外の水圧は生じず、空き缶の変形は無視できるほど小さいと言える。

図 6 は、密閉されているが内部に気泡が封入されている（不飽和は）空き缶の挙動を示している。気泡を含むことによって空き缶内部の体積圧縮率は増大しているため、外圧を受けて応答するためには気泡の体積変化を伴うと考えられ、この場合には内外の水圧差が生じて、空き缶の変形は目に見えるものになると言える。

前節では透水性が大きければ有効応力と変形は生じないことが分かったが、ここでは、透水性が全くない場合（非排水状態）でも間隙が不飽和であれば、水圧変動を受けても有効応力とそれに伴う変形が生じると説明できる。

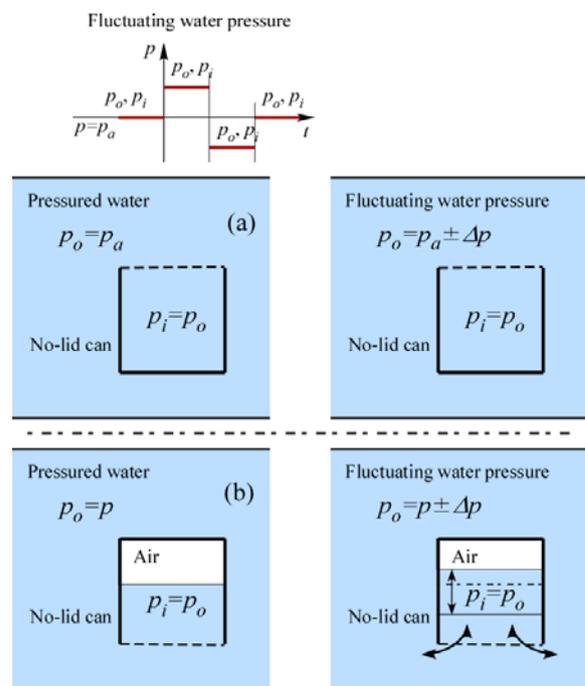


図 4 蓋のない空き缶の挙動

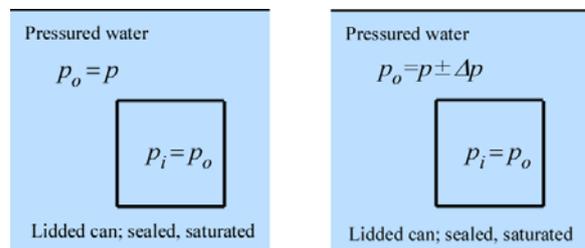


図 5 飽和された空き缶の挙動

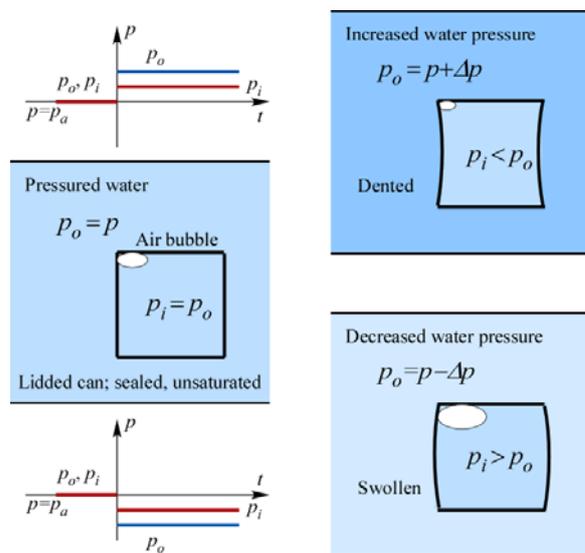


図 6 不飽和な（気泡を含む）空き缶の挙動

3.4 孔を有する不飽和な空き缶の挙動

図 7 は、孔を有しているために、限定的ではあるが水の出入りが許された気泡を有する空き缶の挙動を示して

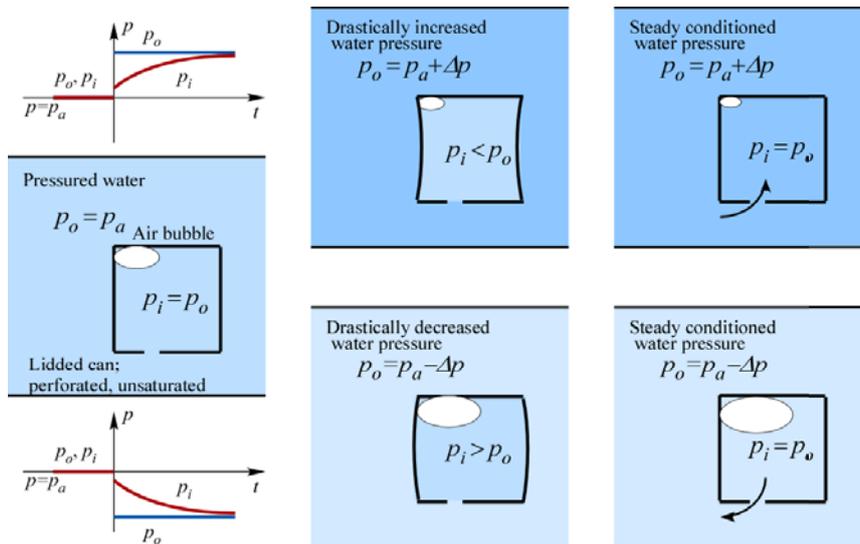


図 7 孔を有する不飽和な（気泡を含む）空き缶の挙動

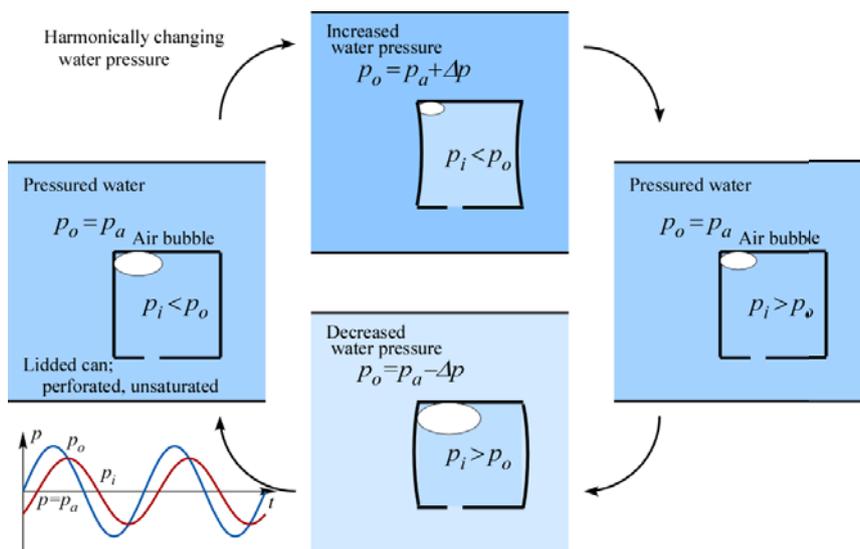


図 8 調和振動する水圧変動を受ける孔を有する不飽和な（気泡を含む）空き缶の挙動

いる。前節で示したように、外圧の急激な変化に対しては、気泡の体積が変化して内外の水圧差を生じて空き缶が変形する。その後、孔を通じて水の出入りが生じるので、時間の遅れを伴って内圧は外圧に漸近すると言える。時間遅れの程度には、気泡の量と孔の大きさの影響を受け、気泡の量が多く、孔が小さいほど時間遅れの程度は強くなると考えられる。

図 8 は調和振動する水圧変動を受ける空き缶の挙動を示している。内圧の応答は外圧に対して遅れを伴うのと同時に、図示のように内圧の変動振幅は外圧の変動振幅よりも小さくなると考えられる。この関係は、気泡の量と穴の大きさに影響されると思われる。

空き缶が孔を有するように、地盤がある程度の透水性がある場合には、間隙水圧は時間遅れと振幅の減衰を伴って外から作用する水圧に対して変動することが明らかである。間隙水圧の挙動は複雑であり、飽和度と透水性の関数であり、飽和度が低く（間隙空気が少なく）、透水係数が

小さい（粒子寸法が小さい）ほど、間隙水圧は時間遅れの特性が顕著になりつつ外から作用する水圧に応答すると説明できる。

3.5 熱伝導型の微分方程式による空き缶挙動の解析

空き缶において、水の流入・流出は内外の水圧に比例すると仮定すると、図 9 に示すような熱伝導系を支配する微分方程式により解析することが可能である。ここでは、物体（温度 T ）が外部の熱源（温度 T_e ）と熱伝導体（熱伝導率 α ）で接触している。この場合の支配方程式は以下のものである。

$$c \frac{dT}{dt} = \alpha(T_e - T) \quad (2)$$

ここで、熱容量 c は気泡が多く、缶構造の剛性が低い場合に対応し、熱伝導率 α は孔が大きい場合に対応している。

熱容量は空き缶内の気泡の量に関連し、熱伝導率は空き缶の孔の大きさに対応することを考慮すると、上式を空き

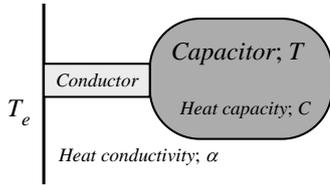


図 9 熱伝導系の概念図

缶モデルに対して適用することができ、以下の微分方程式が得られる。

$$\frac{dp_i}{dt} = \mu(p_o - p_i) \quad (3)$$

ここで、空き缶内の気泡が少なく、孔が大きい場合に係数 μ はより大きな値を取るようになる。この微分方程式（線形、定数係数非斉次）の解（特殊解）は、外圧の調和振動変化 $p_o = -ip_{oa}e^{i\omega t}$ を考慮すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} p_o &= -ip_{oa}e^{i\omega t}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \therefore \Re[-ip_{oa}e^{i\omega t}] = p_{oa} \sin \omega t \\ p_i &= p_{ia}e^{i\omega t} \Rightarrow i\omega p_{ia}e^{i\omega t} = \mu(-ip_{oa} - p_{ia})e^{i\omega t} \\ \therefore p_{ia} &= \frac{-i\mu}{\mu + i\omega} \Rightarrow p_i = \frac{-i\mu}{\mu + i\omega} p_{oa}e^{i\omega t} = \frac{i}{1 + i(\omega/\mu)} p_{oa}e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\omega = 2\pi/T$ は外圧変動の各振動数であり、周期 T に反比例する。導入した係数 (ω/μ) は、空き缶内の気泡が多く、孔が小さい場合に加えて、外圧の変動周期が短いほどより大きな値となる。

図 10 は式(4)を用い、係数 (ω/μ) をパラメータとした計算結果を示している。図 10(a) は空き缶に作用する外圧 p_o と内圧 p_i の変化を 2 周期分の継続時間に対して示している。係数 (ω/μ) が大きいほど、内圧 p_i の外圧 p_o に対する位相の遅れが顕著になるとともに、振幅もより小さくなっていくことが分かる。

内圧と外圧の差 $p_o - p_i$ は空き缶の変形の程度を表している。図 10(b) は内圧と外圧の差 $p_o - p_i$ の変化を 2 周期分の継続時間に対して示している。係数 (ω/μ) の影響は大きく、 (ω/μ) が大きいほど、発生する内圧と外圧の差 $p_o - p_i$ の最大値は大きく、空き缶は収縮・膨張を繰り返してより大きく変形することが分かる。

このような挙動はこのような関係は外圧 p_o に対して内外の水圧差 $p_o - p_i$ をプロットするとよりはっきりする（図 10(c)）。この関係は、内外の水圧の位相差に関してループを描き、係数 (ω/μ) が小さいほど面積は大きくなる傾向がある。ループを描く方向は時計回りで、外圧 p_o が増加する過程で最大になる前に $p_o - p_i$ は最大値に、 p_o が減少する過程で最小になる前に最小値に達する。

3.6 空き缶モデルが示唆する地盤の有効応力応答特性

ここまで、空き缶モデルを用いて種々の状態にある空き缶が水圧変動を外圧として受ける場合の挙動を検討した。特に空き缶内の気泡の量と空き缶が有する孔の大きさの影響に着目した。空き缶モデルと海底地盤のアナロジーから、気泡の量は飽和度に対応し（気泡の量が多いことは飽和度が低い）、孔の大きさは透水係数に対応している（穴が大きいことは透水係数が大きい）。

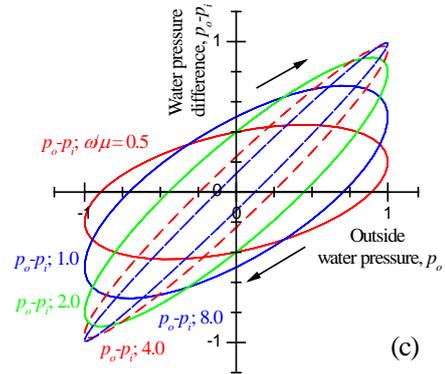
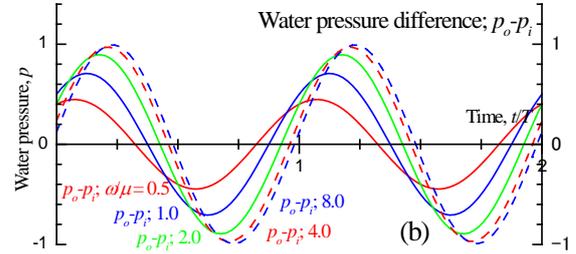
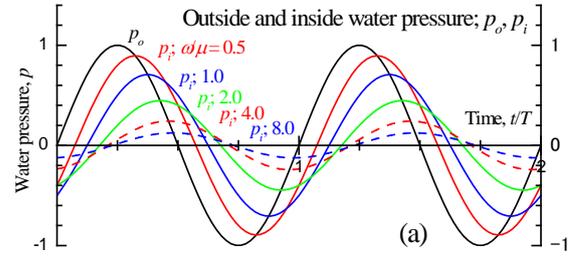


図 10 調和振動水圧変動を受ける空き缶の水圧応答 (a) 空き缶内外の水圧の挙動, (b) 空き缶内外の水圧差の挙動, (c) 水圧差と外水圧の関係

空き缶には直接外力を与えなくても、外側から水圧を受けることによって、内外の水圧差が発生し、空き缶構造も変形することが熱伝導方程式を用いた検討から明らかになった。その際、ある程度の気泡を内部に有し、空き缶が密閉されるか孔を有していることが条件になる。また、位相の差は空き缶の孔をして水が出入りする必要がある。

以上のことは、海底面にたとえ流速が作用しなくても、海底面で水圧が変動するだけで有効応力が変化することを示唆している。有効応力の減少は、地盤材料の剛性と強度、および海底地盤の荷重支持力をも低下させるだろう。

4. 多孔質弾性モデルによる考察

4.1 多孔質弾性モデルによる定式化と解

多孔質弾性モデルを用いることにより、海底地盤の挙動を解析することが可能である。土粒子が形成する多孔質の固体相、間隙水と間隙空気を平均化した間隙流体相、この 2 相の相互作用を考慮した有効応力解析が可能になる。三

表 1 解析で用いた代表的な土質の物理的・力学的性質¹³⁾

| Material Type | Loose Sand | NC Clay | Gravel | Note |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| ρ_f : bulk density of wet material (kg/m ³) | 1,900 | 1,800 | 1,750 | |
| ρ_s : density of solid phase (kg/m ³) | 2,650 | 2,750 | 2,360 | |
| n : porosity | 0.454 | 0.543 | 0.448 | |
| G_s : shear modulus of solid phase (N/m ²) | 0.4×10^8 | 0.3×10^8 | 1.0×10^8 | |
| ν_s : Poisson's ratio | 0.30 | 0.30 | 0.30 | |
| B' : Skempton's B-value in 1-D | 0.40 | 0.80 | 0.60 | |
| k : coefficient of permeability (m/s) | 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-8} | 1.0×10^{-2} | |
| E_{us} : stiffness in 1-D of solid phase (N/m ²) | 1.40×10^8 | 1.05×10^8 | 3.50×10^8 | $E_{us} = 2(1-\nu_s)G_s / (1-2\nu_s)$ |
| K_f : bulk modulus of fluid phase (N/m ²) | 0.424×10^8 | 2.28×10^8 | 2.35×10^8 | $K_f = nE_{us}B' / (1-B')$ |
| S_r : degree of saturation of pore (%) | 99.30 | 99.88 | 99.88 | $S_r = (1/K_a - 1/K_f) / (1/K_a - 1/K_w)$ |
| c_v : coefficient of consolidation in 1D (m ² /sec) | 1.43 | 1.07×10^{-4} | 3.57×10^2 | $c_v = kE_{us} / (g\rho_w)$ |
| h_v : hydraulic Consolidation Factor (sec/m ²) | 1.75 | 1.17×10^4 | 4.67×10^{-3} | $h_v = 1 / (c_v B')$ |

density of air, $\rho_a = 0.0$ (kg/m³)
density of water, $\rho_w = 1000.0$ (kg/m³)

bulk modulus of air, $K_a = 3.03 \times 10^5$ (N/m²)
bulk modulus of saturated water, $K_w = 2.31 \times 10^9$ (N/m²)

浦ら⁵⁾は、多孔質弾性体モデルの定式化の妥当性を広範囲な条件で検討し、一般的な波浪の周期の下では加速度項を無視して速度項までを考慮する準動的条件下で十分な精度が得られること。波長の 10 分の 1 程度の深さまでは、2 次元解析を必要とせず 1 次元解析で十分な精度が得られること。間隙流体の変位を消去して u-p モデルで定式化することによって十分な精度で境界値問題を解くことが可能であることを示した。

本研究では、波浪の解析は線形波動理論の枠組で、海底地盤の挙動は線形弾性理論の枠組で解析することとした。準動的条件下において u-p モデル (u は粒子骨格の変位と p は間隙水圧に対応) により、1 次元条件下で定式化して得た支配方程式は以下のようなものである。

$$\begin{aligned}
 -E_u \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial \Delta p}{\partial z} &= 0 \\
 -B_f \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z \partial t} + B_f \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial t} &= 0 \\
 \Delta \sigma_z &= -E_u \frac{\partial \Delta u_z}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{5}$$

これを無限層厚を仮定して解くことによって、以下のように間隙水圧と有効応力の変動成分 Δp , $\Delta \sigma_z$ の解析解を得ることができる。

$$\begin{aligned}
 \Delta p(z, t) &= \Delta p_o \frac{1}{B_f + E_u} (B_f + E_u e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \\
 \sigma_z(z, t) &= \Delta p_o \frac{E_u}{B_f + E_u} (1 - e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} + (\rho_s - \rho_f) z
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\therefore \Delta p_o e^{-i\omega t} = -\frac{\rho_w g H}{2} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} e^{i\omega t}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \lambda = \frac{2\pi}{L}, \quad \zeta = \sqrt{i\omega h_v} \tag{7}$$

ここで、用いた地盤材料のパラメータ値は、土木学会が実施した共同研究¹³⁾の成果に基づく表 1 に示すようである。

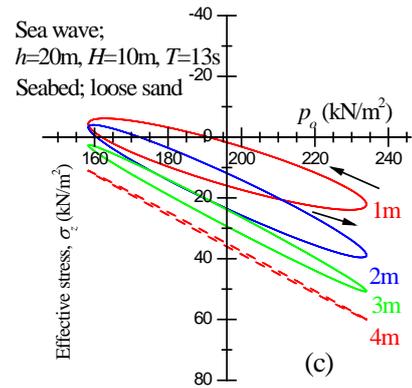
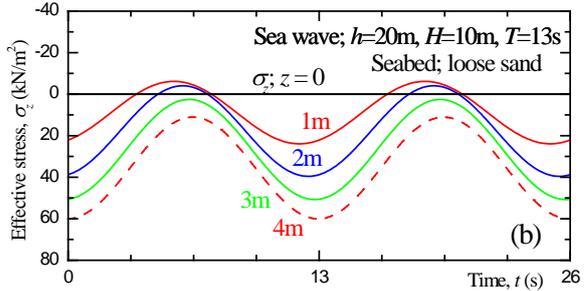
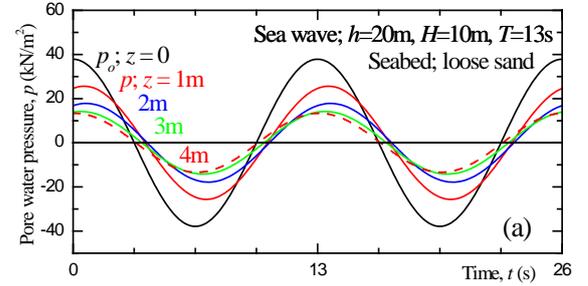


図 11 進行波を受ける海底地盤の水圧応答
(a) 間隙水圧の挙動, (b) 有効応力の挙動, (c) 有効応力と海底面水圧の関係

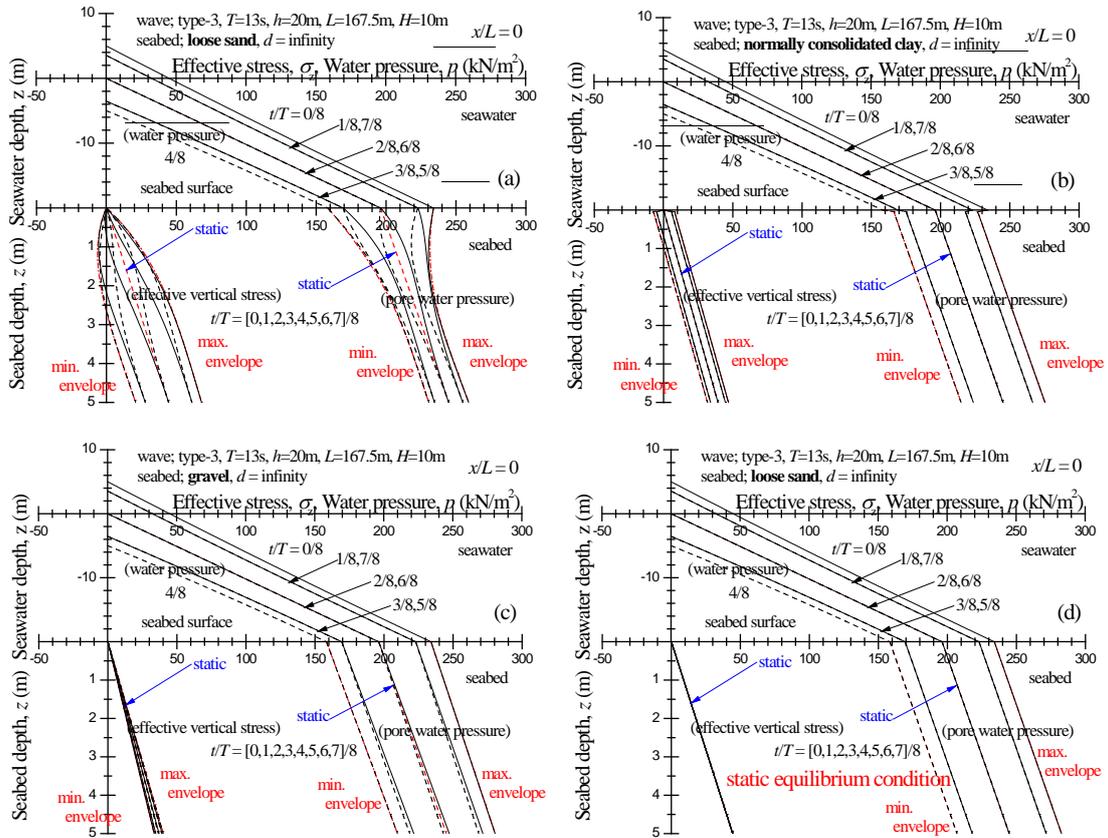


図 12 海底地盤における有効応力挙動 (a) 緩い砂, (b) 正規圧密粘土, (c) 礫, (d) 静的平衡条件 (緩い砂)

また、一様水深波浪場 (水深 $h=20\text{m}$) における進行波を、波高 $H=10\text{m}$ 、周期 $T=13\text{s}$ 、波長 $L=167.5\text{m}$ とした¹³⁾。

4.2 多孔質弾性モデルによる解析結果

図 11 は、緩い砂の条件 (表 1) で計算した海底地盤の有効応力応答挙動を示している。図では、海底面を含めて複数の深さにおける間隙水圧と鉛直有効応力に着目した。

図 11(a) は間隙水圧の挙動を 2 周期の継続時間に対して示している。深さが増すにつれて間隙水圧の振幅は小さくなり、同時に海底面に作用する水圧変動に対して位相の遅れが認められる。図 11(b) は有効応力の挙動を示している。海底面では境界条件として有効応力がゼロであるが、深さが増すにつれて海底地盤が上載荷重となるので有効応力が増し、また、波浪に合わせて振動する特性が認められる。注目すべきは深さ 2m 程度までの浅い範囲で有効応力が繰り返して負になることである。粘着力を持たない砂地盤を想定しているので有効応力が負になる (引張応力が発生する) ことはないが、線形弾性理論の枠組みではやむを得ない計算結果である。少なくとも、海底地盤の比較的浅いところで有効応力が失われ、一時的に液化のような状態になる可能性が高いことを示していて、地盤の荷重支持能力は繰り返して失われることを示唆している。図 11(c) は有効応力と海底面に作用する水圧の関係を示している。空き缶モデルと同様にこの関係が、位相差によって反時計回りにループを描いている。海底面の水圧が減少す

る過程において最小になる少し手前で有効応力が最小になり、浅い範囲では負になっている。

図 12 は表 1 に示した 3 種類の地盤材料 (緩い砂、正規圧密粘土、礫) に加えて、緩い砂において波が静止していると仮定して計算した静的平衡条件の挙動も示している。図には 1 周期を 8 分割して挙動を示していて、上段には海水中の水圧の深さ方向分布を、下段右には間隙水圧、下段左には有効応力の深さ方向分布を示している。

地盤材料の違いによる比較では (図 12 (a,b,c))、緩い砂が最も大きな有効応力応答を示している。これに対して、オーダーが違って透水係数の小さい粘土では有効応力の変化はあるものの、位相の遅れは見られず有効応力の変動は深さ方向に差が無い。また、オーダーが違って大きな透水係数の礫では、間隙水圧の変動が深さ方向にはほとんど変化なく、したがって、有効応力の変化も緩い砂の数分の 1 程度である。

図 12(d) が示す静的な平衡条件の計算では、波浪が作用しても有効応力はまったく変化しない結果となっている。これは本論文の前半で考察した古典的な地盤力学の範囲に相当するものであり、静的平衡条件では海底地盤の有効応力応答を評価できないことを改めて示している。ただし、透水係数の大きな礫の場合は過剰間隙水圧の消散が早く、短時間で静的平衡条件に達するため、この計算結果に近いものとなっている。



写真 1 模型実験装置

5. 広口瓶を用いた海底地盤模型による考察

5.1 実験条件

模型実験装置を写真 1 に示す。直径 15cm ほどの広口瓶に水を張り、乾燥した珪砂 8 号（平均粒径 0.1mm 以下）を投入した。構造物の模型として、直径 24mm 長さ 70mm のボルトを 20mm 程度砂に差し込んだ。広口瓶は上部まで水を満たし、予め穴を空けて注射器を取り付けてある蓋を閉めた。この状態で周期 5s の片振幅 0.5 気圧の水圧変動を手動で作用させた。

5.2 実験結果

水圧変動が作用するとボルトは断続的に沈下し、その沈下は水圧が低下する過程で生じることが確認できた。発表では動画を紹介して説明する。

式(5)の支配方程式を海底地盤の有限深さ条件で解くと分かるが、水圧変動によってボルトが沈下する現象を深さ 250mm 程度の模型地盤で再現するのは困難であって、実験では注射器を用いて地盤内に気泡を 2cm³程度注入することによって飽和度を下げに低下させることによって初めて現象を観察できた。沈下のメカニズムは図 13 に示すようである。水圧の増大・減少と対応する気泡の収縮・膨張により、下向・上向きの浸透流が発生する。水圧が低下して浸透流が上向きの時に有効応力が減少し、荷重支持力が低下した地盤でボルトが沈下すると説明できる。

6. おわりに

「古典的な地盤力学」、「空き缶モデル」、「多孔質弾性体を用いた解析」により種々の観点から波浪による水圧変動に対する海底地盤の有効応力応答を考察した。

その結果以下のようなことが分かった。

- 1) 古典的な地盤力学のように静定な平衡条件を検討しても有効応力は応答は適切に評価できない。
- 2) 有効応力応答においては不飽和度（空き缶内の気泡の量）、透水係数（空き缶の穴の大きさ）が支配的

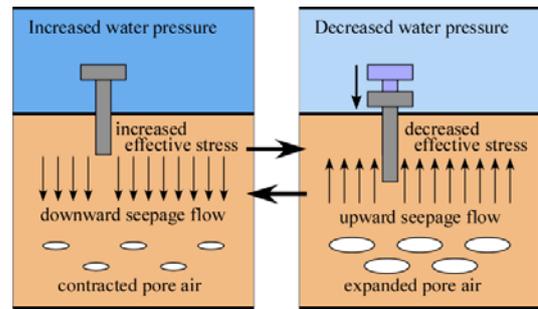


図 13 模型実験で観察されたボルト沈下のメカニズム

であり、位相の遅れを伴った挙動が現れる。

- 3) 緩い砂の場合、飽和度が 99% 以上であるにも関わらず位相の遅れを伴う有効応力が顕著に見られる。
- 4) 広口瓶を用いた小規模な模型実験では、海水流速が無くても海底地盤の支持力が低下して構造物が沈下することを確認した。

参考文献

- 1) 西田仁志, 山口豊, 近藤豊次: 孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.365-369.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S. and Kamata, A.: Settlement of breakwater on submarine soil due to wave-induced liquefaction, 5th ISOPE, Vol.2, pp.237-242, 1995.
- 3) Yamamoto, T., H. S. L. Koning and E. Van Hijum: On the response of a pore-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol.87, part 1., pp.193-206, 1978.
- 4) Zen, K. and Yamazaki, H.: Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.90-104, 1990.
- 5) 三浦均也・浅原信吾・大塚夏彦・上野勝利: 波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化, 第49回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 233-240, 2004.
- 6) Zen, K. and Yamazaki, H. (1991). "Field Observation and Analysis of Wave-induced Liquefaction in Seabed," Soils and Foundations, 31, 4, 161-179.
- 7) Miura, K., Asahara, S., Otsuka, N., and Tanaka, J. (2008). "Field Observation of Wave induced Seabed Behavior for the Estimation of Geomaterial Properties and the Effect of Permeable Column Method," Proc 18th Int Offshore and Polar Eng Conf, Vancouver, ISOPE, 483-490.
- 8) 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, Vol.73, No.2, pp.1117-1122, 2017.
- 9) 三浦均也, 守政信吾, 大塚夏彦, 山崎浩之, 小浪岳治: 海底地盤の不安定化に及ぼす流速と水圧変動の相乗効果, 土木学会論文集, Vol. 66, No.1, 851-855, 2010.
- 10) Anh Quang TRAN, 三浦均也, 松田達也, 吉野貴仁: 直線構造物への斜行反射重複波を受ける海底における底質移動と侵食・堆積の定量的評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, No.2, 2018.
- 11) 三浦均也, 松田達也, 後藤志侑子: 円柱構造物周辺における海底地盤の有効応力応答を考慮した底質移動解析. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.851-856, 2018.
- 12) Karl Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, chap.2, pp.24-25, 1943.
- 13) 土木学会: 「海岸波動」, pp. 430-503, 1994.