# 多孔質線形弾性モデルを用いた層状海底地盤の波浪に対する有効応力応答解析

豊橋技術科学大学　　学生会員　○中井響太
豊橋技術科学大学　　正会員　三浦均也，松田達也

## 1.　はじめに

荒天時の波浪の影響により防波堤や離岸提の被害が確認されている。それは構造物に直接作用する水圧による衝撃が主要な要因として考えられるが，同時に海底地盤が不安定化することによる沈下が施設の被害を拡大させる危険がある。北海道奔幌戸漁港の事例では，波浪による地盤の液状化が原因となり防波堤が沈下する被害が見られた。そこで現在地盤工学の分野では，海底面に作用する水圧に対する応答解析が求められている。本研究では海底地盤の波浪に対する有効応力応答解析を行い，海底地盤の安定性において有利な特性を調べ，また従来解析対象とされなかった層状地盤においての解析を行った。

## 2.　解析手法

波浪による地盤の液状化は，間隙水の圧縮性が原因であり，海底面に作用する水圧の変動に間隙水が対応できないため起こる。そこで本研究では，土粒子を固体相として多孔質な弾性体とし，間隙水と間隙空気を平均化した流体相とし圧縮性流体として単純化し，2 相系材料として取り扱う。解析では多孔質弾性論に基づいた *u-p model* を用い，その支配方程式をテンソル表記で以下に示す。

### (1) 固体相の平衡条件

固体相の変位−ひずみ−応力関係と連続条件より以下の式が得られる。

$$(1-n)\rho_s\Delta\ddot{u}_i-(\lambda+\mu)\Delta u_{j,ji}-\mu\Delta u_{i,jj}=(1-n)(\rho_s-\rho_f)\Delta g_i+d_{ij}\Delta\dot{w}_j \tag{1}$$

$$d_{ij}=\frac{\rho_w g}{k}\delta_{ij}\quad \because\ k_{ij}=k\delta_{ij} \tag{2}$$

ここに，ドット（・）は物質時間微分を表し $\rho_s$，$\rho_f$，$\rho_w$ はそれぞれ固体相，流体相，水の密度である。また，$u_i$ は固体相の変位，$w_i$ は流体相の固体相に対する相対変位，$n$ は空隙率，$g$ は重力加速度である。$k$ は透水係数，$\delta$ は伸びで，$d_{ij}\Delta\dot{w}_j$ は相対速度によって固体相と流体相の間に生じる単位体積当たりの浸透力の増分を表す。

### (2) 液体相の平衡条件

Darcy の法則に基づき，固体相の相対変位より以下の式が得られる。

$$n\rho_f\Delta\ddot{u}_i+\rho_f\Delta\ddot{w}_i+\Delta p_{,i}=\rho_f\Delta g_i-d_{ij}\Delta\dot{w}_j \tag{3}$$

ここに，$p$ は水圧である。

### (3) 固体相と流体相を統合した多孔質体の適合条件

$$\rho_t\Delta\ddot{u}_i+\rho_f\Delta\ddot{w}_i-(\lambda+\mu)\Delta u_{j,ji}-\mu\Delta u_{i,jj}+\Delta p_{,i}=\rho_t\Delta g_i \tag{4}$$

ここに，$\rho_t$ は多孔質全体の平均化した密度である。

### (4) 体積の適合条件

水圧による固体相の体積変化と液体相の体積変化の和から次式が求められる。

$$B_f\left(\Delta\dot{u}_{i,i}+\Delta\dot{w}_{i,i}\right)+\Delta\dot{p}=0 \tag{5}$$

ここに，$B_f$ は流体相の間隙水圧係数である。

### (5) *u-p model* の支配方程式

これらの式をまとめ，相対加速度増分 $\Delta\ddot{w}=0$ とし整理すると以下のような式が得られる。

$$\rho_t\Delta\ddot{u}_i-(\lambda+\mu)\Delta u_{j,ji}-\mu\Delta u_{i,jj}+\Delta p_{,i}=\rho_t\Delta g_i$$

$$n\rho_f B_f\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\Delta\ddot{u}_{j,i}-B_f\Delta\dot{u}_{i,i}+B_f\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\Delta p_{,ji}-\Delta\dot{p}=B_f\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\rho_f\Delta g_{j,i} \tag{6}$$

$$\Delta\dot{w}_i=\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\left(-n\rho_f\Delta\ddot{u}_j-\Delta p_{,j}+\rho_f\Delta g_i\right)$$

一般的に波浪は加速度の影響が比較的小さく本研究では加速度項 $\Delta\ddot{u}_i,\Delta\ddot{w}_i$ を無視した準動的解析をおこなう。その際の支配方程式は次式となる。

$$-(\lambda+\mu)\Delta u_{j,ji}-\mu\Delta u_{i,jj}+\Delta p_{,i}=\rho_t\Delta g_i$$

$$-B_f\Delta\dot{u}_{i,i}+B_f\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\Delta p_{,ji}-\Delta\dot{p}=B_f\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\rho_f\Delta g_{j,i} \tag{7}$$

$$\Delta\dot{w}_i=\frac{k_{ij}}{\rho_w g}\left(-\Delta p_{,j}+\rho_f\Delta g_i\right)$$

## 3.　解析条件

簡易化のため本研究では 1 次元問題を取り扱う。解析にあたり，まず海底地盤の初期状態を *u-p model* に重力が作用した静的条件で求める。波浪条件は一様水深 $h$ の波浪場において，平面波を受けるものとし，波

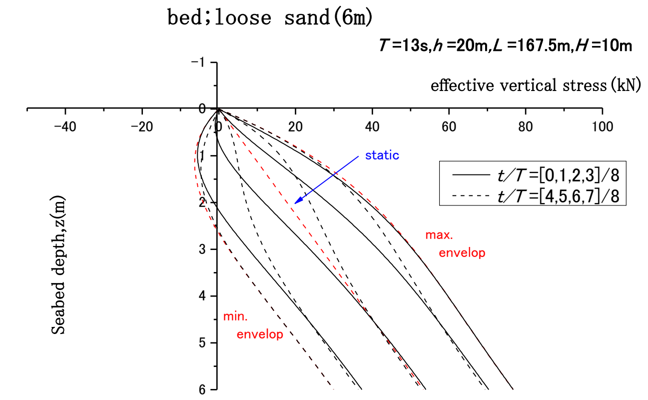


図-1　緩い砂地盤の解析結果

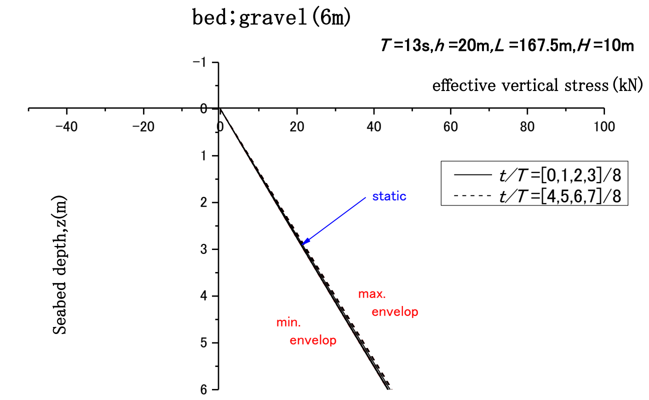


図-2　礫地盤の解析結果

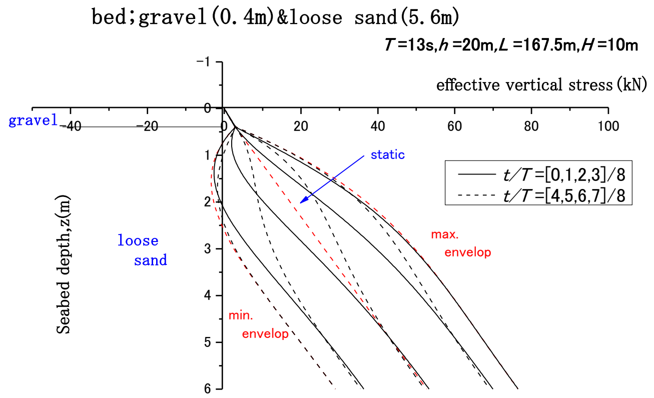


図-3a　礫地盤(0.4m)+緩い砂地(5.6m)の解析結果

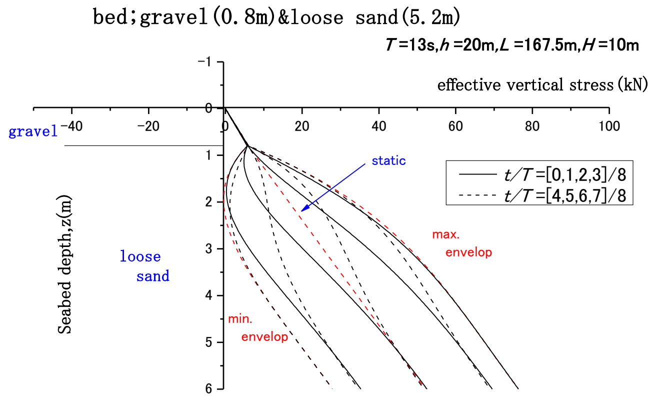


図-3b　礫地盤(0.8m)+緩い砂地(5.2m)の解析結果

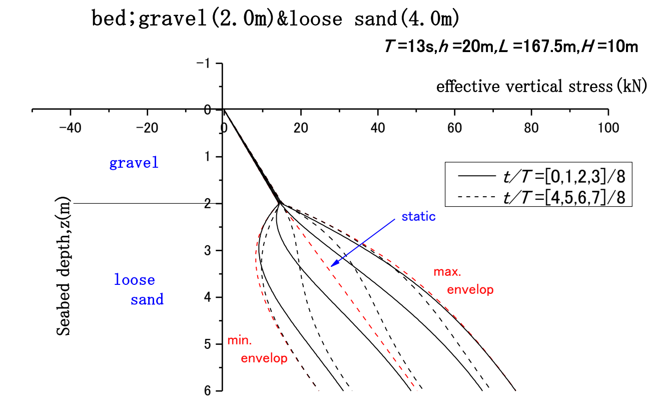


図-3c　礫地盤(2.0m)+緩い砂地(4.0m)の解析結果

浪の挙動は三角関数波を対象とした微小振幅波理論で計算する。そして波浪を受けることによる変位や水圧，応力の静水条件からの変動成分を，*u-p model* を指数関数や双曲関数で展開した解を用いて計算する。ここでは上層が礫層，下層が緩い砂層とした深さ $z=6m$ の層状地盤において，二層の層厚を変動させ解析した結果を示し考察する[1)]。

## 4.　結果と考察

周期 $T=13s$，水深 $h=20m$，波長 $L=167.5m$，波高 $H=10m$，とし，周期を 8 分割して計算した。上層の礫層が 0.4m，0.8m，2m の解析結果と，緩い砂，礫層のみの地盤の結果を図-1 から図-3c に示す。

緩い砂地盤では波浪を受けるとおよそ深さ 2.5m までで有効応力がマイナスになるいわゆる液状化の状態が見られた。これに対して，上層に礫層が存在する場合，礫層の厚さを 0.8m とすることで有効応力がマイナスの値となる状況が見られなくなった，2m とした場合にはより安定した有効応力応答が見られた。これらより不安定になる可能性がある砂層の上に礫層を配置すると，砂地盤が安定化する効果が得られることが分かった。海底地盤解析において地盤の層構造を考慮した解析が必要であると言える。

**【参考文献】**

1)　三浦ら:第 49 回地盤工学シンポジウム論文集 2004.