

# 変動水圧によるブロック周辺地盤の弾塑性挙動

## Elasto-plastic Behavior of Seabed around Block by Water Wave Pressure

桑原久実\*・大槻正紀\*\*

Hisami, Kuwahara and Seiki, Ohmaki

The aim of this paper is to study numerically the seabed response around the block by the water waves. The excess pore pressure in the seabed is accumulated by the cyclic load of the waves and the block is the danger of the settlement. The method of numerical analysis is solved by the finite element method with using the Biot's two mixture theory and the elasto-plastic theory.

The gradient of the pore pressure and the shear strain generates strongly at the seabed of the block edge. The seabed around the block is stable as the permeability and the specific gravity is large.

keywords: liquefaction, cyclic water wave, block, seabed

### 1. はじめに

波浪の波圧変動により、海底地盤の有効応力と間隙水圧は変動し、地盤表面付近は液状化することがある。これは、海岸で発生する漂砂、洗掘、底質の巻き上げなどの現象と密接に関連しているものと考えられる。

波浪による海底地盤に発生する過剰間隙水圧の変動は、変動過剰間隙水圧と残留過剰間隙水圧に分けて示すことができる<sup>1)</sup>。

変動過剰間隙水圧は、一周期当たり過剰間隙水圧の平均値が変化しないものであり、波の峰が来ると地盤は高密度化し、波の谷が来ると液状化する。このような海底地盤の挙動を対象にした研究は、Biotの圧密理論を基礎としYamamoto et al.<sup>2)</sup>らによって進められ、我国でも、ウォーターフロントが注目されるようになり、名合<sup>3)</sup>、善ら<sup>4)</sup>、前野ら<sup>4)</sup>、酒井ら<sup>5)</sup>など数多くの研究者によって活発に研究されている。筆者の一人も<sup>6)</sup>波圧の時間的な変動特性が海底地盤の安定性に与える影響について検討している。一方、残留過剰間隙水圧は、一周期当たりの平均値が波浪の繰り返し作用によって上昇するものであり、過剰間隙水圧の蓄積により有効応力が低下し液状化するものである。これは、地震による液状化と似た現象と言える。

海底地盤上に設置されるブロックは、波浪による地盤の液状化によって沈下することが報告されている。名合ら<sup>7)</sup>は、この問題に着目し数多く研究を行っているが、実験は過圧密状態の砂地盤で行い、解析はBiotの圧密理論を用い地盤変形を弾性論で表現しているため、過剰間隙水圧の蓄積を考慮せず変動過剰間隙水圧のみを対象としたものとなっている。

魚礁ブロックの設置地盤は、かなり沖合いに位置するため海底地盤の粒径は小さく、また、ルーズに堆積しているものと考えられる。このような地盤に大きな波浪が作用すると、波圧の繰り返し荷重により塑性ひずみが生じ、その結果、過剰間隙水圧が蓄積され液状化するものと予想される。このようになると魚礁ブロックは沈下してしまい、その機能を果たさなくなる。最近、水産資源を増大させるため砂泥域の開発が注目されており、このような地盤の安定性を評価することは重要な課題となっている。

以上の背景から、本研究は、波浪によるブロック周辺地盤の挙動について、Biotの二相混合体理論(慣性項を含む)を基礎式とし、地盤変形の非線形性を弾塑性論で表現し、波浪の繰り返しによる残留過剰間隙水圧の発生を考慮したブロック周辺地盤の安定性を有限要素法により検討しようとするものである。

### 2. 解析手法の概要

波浪による海底地盤の弾塑性挙動解析は、柴田ら<sup>8)</sup>によるものであり解析手法の概要を示すと次のようになる。基礎式は、次式のような地盤変形と間隙水の相互作用を考慮したBiotの二相混合体理論を用いている。

$$[\text{釣合式}] \quad \rho \ddot{u}_i = \sigma_{i,j,j} + \rho b_i \quad (1)$$

$$[\text{連続式}] \quad \rho_f \ddot{u}_{i,j} - p_{,i,j} - \frac{\gamma_w}{k} \dot{\epsilon}_{i,j} + \frac{n\gamma_w}{k K_f} \dot{p} = 0 \quad (2)$$

\* 正会員 水産庁 水産工学研究所 水産土木工学部 漁港施設 研究員 (〒314-04 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

\*\* 正会員 同上 室長

ここに、 $\rho$ :地盤の密度、 $\rho_f$ :間隙流体の密度、 $p$ :間隙水圧、 $\gamma_w$ :間隙流体の単位体積重量、 $k$ :透水係数、 $n$ :間隙率、 $b$ :物体力、 $\sigma$ :全応力、 $u$ :地盤骨格の変位、 $\varepsilon$ :地盤骨格の歪、 $K_f$ :間隙流体の体積弾性係数である。

基礎式は有限要素法のために離散化すると、次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} [M] + \beta \Delta t^2 [K]_{i,t+\Delta t} & \vec{K}_v \\ \vec{K}_v^T & A - \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{u}_{N1,t+\Delta t} \\ p_{i,t+\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \Sigma \alpha_i p_{i,t+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{F}_{i,t+\Delta t} - \vec{R}_{i,t} - [K]_{i,t+\Delta t} (\Delta t \vec{u}_{N1,t} + (1/2 - \beta) \Delta t^2 \vec{u}_{N1,t}) \\ \vec{K}_v^T (\vec{u}_{N1,t} + (1 - \gamma) \Delta t \vec{u}_{N1,t}) / (k(1/g - \gamma \Delta t/k)) + A p_{i,t} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{1}{\gamma_w(1/g - \gamma \Delta t/k)} \alpha_i, \quad \alpha_i = \frac{1}{\gamma_w(1/g - \gamma \Delta t/k)} \alpha_i, \quad \alpha = \Sigma \alpha_i \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{dt(1/g - \gamma \Delta t/k)} \int_V \frac{n}{k K_f} dv \quad (5)$$

[M]:質量マトリクス、[K]:剛性マトリクス、 $g$ :重力加速度、 $K_v$ :体積歪、 $\beta, \gamma$ :newmark- $\beta$ 法の定数、 $F$ :境界力ベクトル、 $R$ :応力増分ベクトル、 $\Delta t$ :時間間隔、 $\alpha_i$ :要素 $i$ と隣接要素の重心距離と要素の幅で計算される。

地盤変形は、岡・足立<sup>9)</sup>による地盤の構成式を用いている(図-1,参照)。降伏は、応力比が変化すれば常に生じるものとしている。降伏関数 $f$ は、次式で示される。

$$f = \overline{\eta}_{(n)} - k_s \quad (6)$$

ここに、 $k_s$ :歪硬化パラメーター、 $\overline{\eta}_{(n)}$ :応力反転時との相対応力比で次式で示される。

$$\overline{\eta}_{(n)} = \{ (\eta_{ij} - \eta_{ij(n)}) (\eta_{ij} - \eta_{ij(n)}) \}^{1/2} \quad (7)$$

$\eta_{ij}$ (= $s_{ij}/\sigma_m$ ):偏差応力比テンソル、 $s_{ij}$ :偏差応力テンソル、 $\sigma_m$ :平均有効応力である。

歪硬化パラメーター $k_s$ は、双曲線関数の次式を用いる。

$$k_s = \frac{\overline{\eta}_{(t)} G' \overline{\gamma}^P}{\overline{\eta}_{(t)} + G' \overline{\gamma}^P} \quad (8)$$

ここに、 $G'$ :定数、 $\overline{\eta}_{(t)}$ :破壊時の相対応力比であり次式で示される。

$$\overline{\eta}_{(t)} = \{ (\eta_{ij(t)} - \eta_{ij(n)}) (\eta_{ij(t)} - \eta_{ij(n)}) \}^{1/2} \quad (9)$$

また、 $\overline{\gamma}^P$ :相対塑性歪であり、次式で示される。

$$\overline{\gamma}^P = [ (e^p_{ij} - e^p_{ij(n)}) (e^p_{ij} - e^p_{ij(n)}) ]^{1/2} \quad (10)$$

ここに、 $e^p$ :塑性偏差歪である。

塑性ポテンシャルは、次式で示される。

$$g = \overline{\eta}_{(n)} + \overline{M} \ln(\sigma'_m / \sigma'_{m(n)}) \quad (11)$$

ここに、 $\overline{M}$ :変相応力比、 $\sigma'_{m(n)}$ :応力反転時の応力比と塑性ポテンシャルの交点の平均有効応力である。

変相応力比を決めるのに用いる過圧密境界曲面は、次式で示す。

$$f_b = \overline{\eta}_{(c)} + \overline{M}_m \ln(\sigma'_m / \sigma'_{m_b}) \quad (12)$$

ここに、 $\overline{\eta}_{(c)}$ :正規圧密終了時の相対応力比、 $\sigma'_{m_b}$ : $f_b=0$ と圧密終了時の応力比一定線との交点の平均有効応力、 $\overline{M}_m$ :せん断変形仮定において体積圧縮歪が最大となるときの応力比である。

また、変相応力比 $\overline{M}$ は、正規圧密領域( $f_b \geq 0$ )では、

$$\overline{M} = \overline{M}_m \quad (13)$$

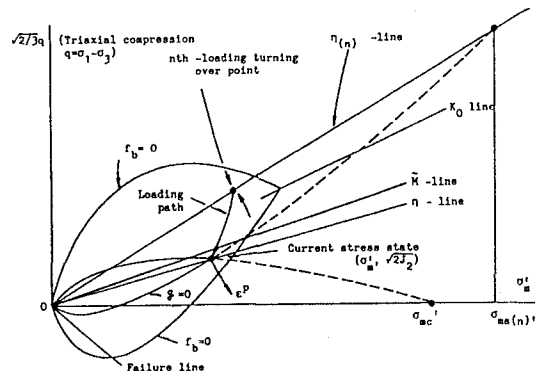


図-1 岡・足立の土砂構成モデル<sup>9)</sup>

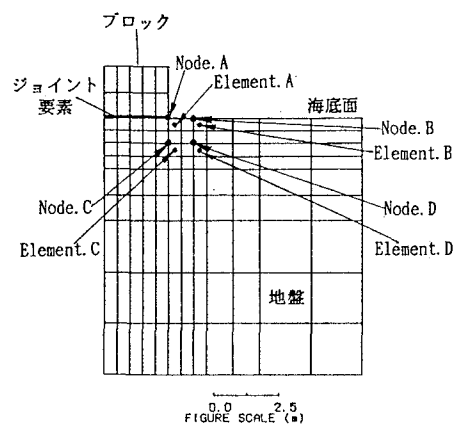


図-2 解析モデルと要素分割

表-1. 変化させたブロック及び地盤の物性値

	case.1	case.2	case.3	case.4	case.5
地盤の透水係数 $k$ (m/s)	0.0001	0.00001	0.0001	0.0001	0.0001
間隙流体の体積弾性係数 $K_f$ (KN/m <sup>2</sup> )	$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$
ブロックの透水係数 $k_s$ (m/s)	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0
ブロックの密度 $\rho_b$ (t/m <sup>3</sup> )	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0

であり、過圧密領域( $f_b < 0$ )では、次式のように定める。

$$\bar{\gamma} = -\eta / \ln(\sigma'_m / \sigma'_{m,c}) \quad (14)$$

$\eta = (\eta_{ij} \eta_{ji})^{1/2}$ :現在の応力比,  $\sigma'_{m,c}$ :過圧密境界曲面と $\sigma'_m$ 軸との交点である。

図-2は、解析モデルと要素分割を示している。解析における境界条件は、海底面とブロックの上面は波圧変動が作用し、側面は水平固定、底面は水平と鉛直固定、海底面以外は非排水としている。ブロックと海底地盤の境界にはジョイント要素を用いている。また、ブロックの透水性は無いものとしている。

表-1は、地盤およびブロックの特性による海底地盤の挙動を見るために変化させた物性値を示している。case.1を基準とし、case.2は地盤の透水係数を小さく、case.3は間隙流体の弾性係数を小さく(空気含有率を大きく)、case.4はブロックに透水性を持たせ、case.5はブロックの比重を大きくした場合である。表-1で示した物性値の他に次のようなものを共通して用いている。

[地盤]  $n=0.4, K=1.67 \times 10^5 \text{KN/m}^2, G=3.57 \times 10^4 \text{KN/m}^2, \rho=2.0 \text{t/m}^3, \rho_s=1.0 \text{t/m}^3, M_m=0.7, M=0.9$

[ジョイント]  $k_n=1.67 \times 10^5 \text{KN/m}^2, k_s=3.57 \times 10^4 \text{KN/m}^2, \delta=35.0 \text{度}$

[ブロック]  $K_B=2.50 \times 10^7 \text{KN/m}^2, G_B=1.04 \times 10^7 \text{KN/m}^2$

ここに、 $K$ :地盤の体積弾性係数、 $G$ :地盤のせん断弾性係数、 $k_n$ :垂直方向の弾性定数、 $k_s$ :せん断方向の弾性定数、 $\delta$ :壁面摩擦角、 $K_B$ :ブロックの体積弾性係数、 $G_B$ :ブロックのせん断弾性係数である。

正規圧密終了時および初期の地盤内応力は、地盤とブロックの自重を作用させ弾性理論による有限要素法で求めている。

海底面に作用する波圧変動は、微小振幅波理論を用いて、波長が十分長いものとして水平方向の圧力勾配を考慮せず次式のように与えている。また、水平方向の流速変動によりブロックに作用する流体力、海底面せん断力は考慮していない。

$$p_b = \frac{\rho_w g H}{2} \frac{\cosh k(h+Y)}{\cosh kh} \sin(\omega t) \quad (15)$$

ここに、 $H$ :波高、 $h$ :水深、 $k:2\pi/L$ 、 $\omega:2\pi/T$ 、 $T$ :周期、 $L$ :波長、 $t$ :経過時間である。

本研究で用いた波浪特性は、 $H=4.0\text{m}$ 、 $h=10.0\text{m}$ 、 $T=8.0\text{sec}$ である。また、計算ステップは、波の周期 $T$ の1/12であり、8周期まで計算している。

### 3. 結果および考察

#### 1) ブロック周辺地盤の一般的な挙動

図-3は、波浪によるブロック周辺地盤の経時変化(case.1)を示している。(a)~(e)は順に、海底面の波圧変動 $P_b$ 、水平変位 $u_x$ 、鉛直変位 $u_y$ 、せん断歪み $\gamma$ 、平均有効応力 $\sigma'_m$ である。

波浪の繰り返し作用によって、地盤変位、せん断歪は大きくなり、平均有効応力は減少していることが分かる。(b)の水平変位は、ブロック外側の海底面(Node.B)はブロックから離れる方向に移動しており、(c)の鉛直変位は、ブロック外側の海底面(Node.B)は下向きに、地盤内部ではやや上向きに移動している。(d)のせん断歪はブロック外縁の地盤(Element.A)で非常に大きくなっていることが分かる。(d)の平均有効応力は、ブロック外側の地盤(Element.B)は一波目の波の谷が作用することによって液状化し、ブロック基礎地盤(Element.D)は波の繰り返しによって大きく減少していることがわかる。

図-4は、ブロック周辺地盤の有効応力経路を示している。黒丸は初期応力状態である。(a)はElement.A, B, (b)はElement.C, Dについて示している。いずれも波圧の繰り返し作用によって複雑な挙動を示

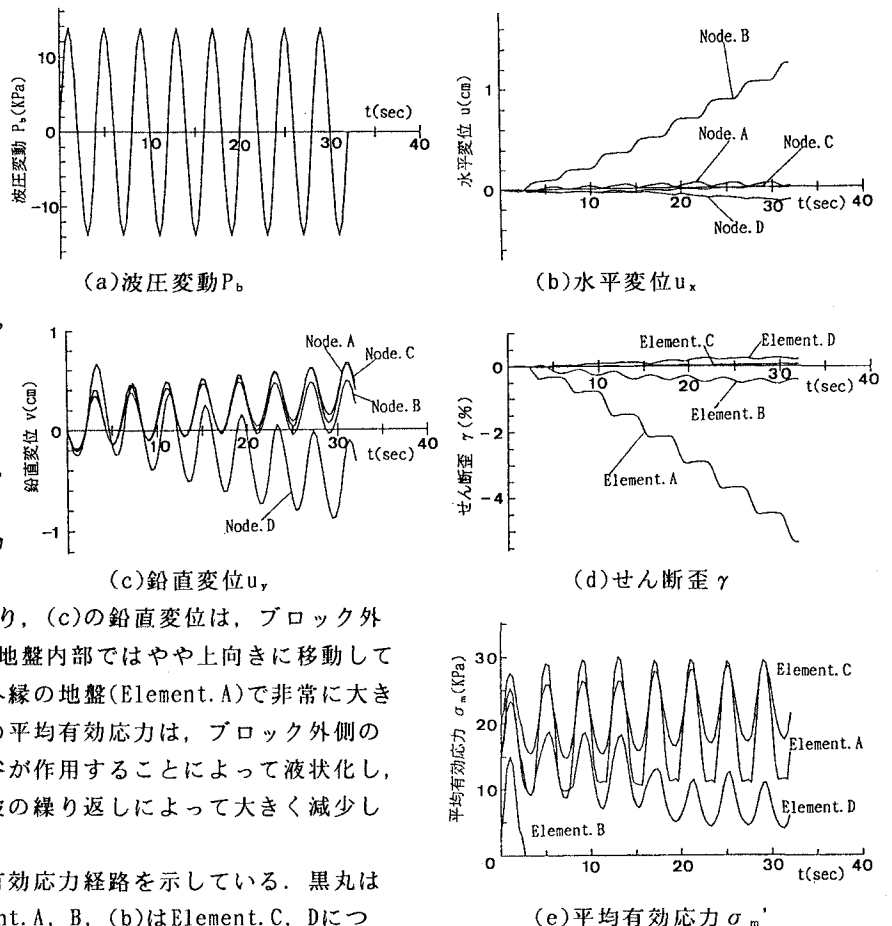


図-3. ブロック周辺地盤の挙動

すが、ブロック外縁の地盤(Element. A)は応力変動が大きく、せん断応力も大きく変動していることがわかる。

図-5は、ブロック周辺地盤の挙動(case. 1)を分布図で示したものである。(a)はせん断歪、(b)は有効応力および(c)は間隙水圧であり地盤変位と共に示してある。(i)は2周期目、

(ii)は8周期目の波の谷が作用した時の状態である。図-6は、初期平均有効応力を示している。

(a)よりせん断歪についてみると、2周期目ではほとんど変化は見られないが、8周期目の波が作用した場合、ブロックの外縁で大きなせん断歪が生じており、このようなところで地盤が大きく盛り上がったように変位していることがわかる。これは、(c)から分かるように、ブロック外縁の地盤に生じた間隙水圧の勾配(浸透力)によるものと考えられる。このようにブロック周辺の地盤が盛り上がる現象は、名合ら<sup>7)</sup>の実験結果でも生じており、本解析はこの現象を説明しているものと考えられる。

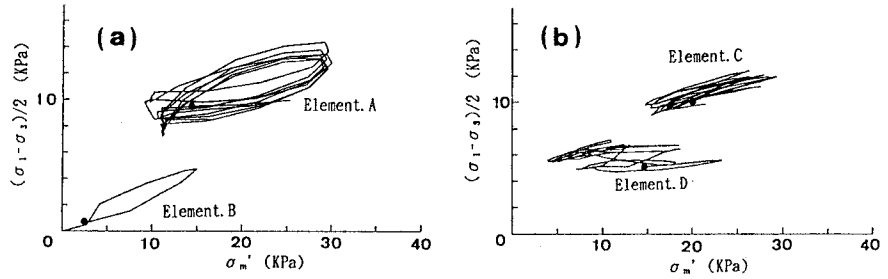
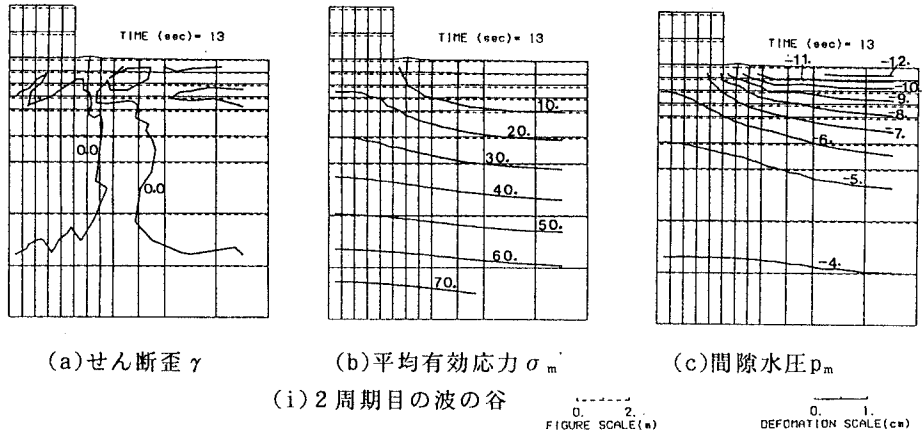


図-4. 有効応力経路

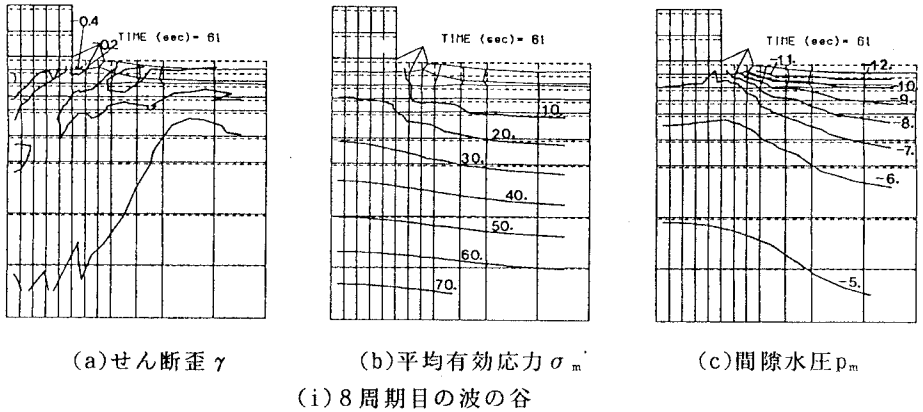


(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m'$

(c)間隙水圧  $p_m$

(i) 2周期目の波の谷



(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m'$

(c)間隙水圧  $p_m$

(ii) 8周期目の波の谷

図-5. ブロック周辺地盤の挙動分布

## 2) 地盤およびブロックの特性による地盤応答の変化

図-7は、地盤およびブロックの特性による地盤応答の変化を分布図で示している。(i)は地盤の透水係数を小さくした場合(case. 2), (ii)は間隙流体の弾性係数を小さくした場合(case. 3), (iii)はブロックが透水性を有する場合(case. 4), (iv)はブロックの比重を大きくした場合(case. 5)である。(a)は8周期目の波の谷が作用した場合のせん断歪、(b)は平均有効応力および(c)は間隙水圧を示している。

(i)の地盤の透水係数を小さくすると、地盤変位は小さくなっていることがわかる。しかし、ブロック外縁に大きな動水勾配が生じ、せん断歪が発生していることから、さらに波が作用すると地盤は危険になると考えられる。

(ii)の間隙流体の弾性係数を小さくすると、地盤の有効応力は大きく減少し、ブロック外縁に大きなせん断歪が生じていることがわかる。間隙水圧は、波の谷の波圧より低下しているところがあるが、地盤の共振現象によるものか、さらに検討を進めたいと考えている。

(iii)のブロックに透水性を有する場合、ブロック外縁の動水勾配は小さくなっており、せん断歪、地盤の変位は小さくなっていることがわかる。

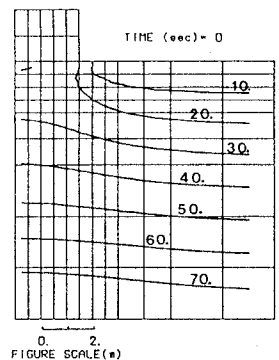


図-6 初期平均有効応力

(iv)のブロックの比重を大きくすると、ブロック外縁で大きな動水勾配が生じているが、ブロックの自重による抑えの効果によって、せん断歪、地盤の変位は小さくなっていることがわかる。

4. おわりに

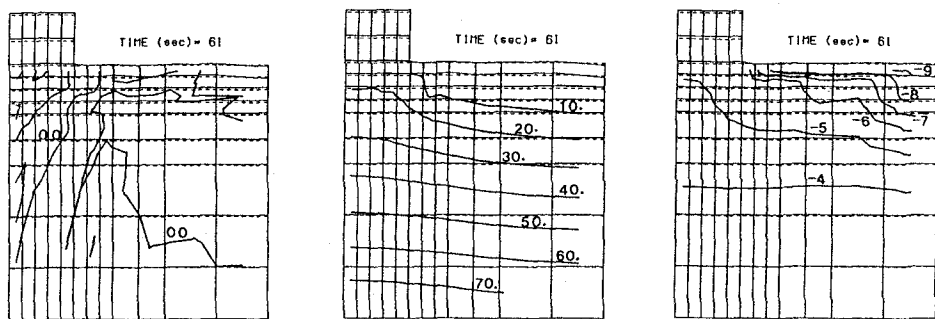
波浪などの変動水圧による地盤の挙動を弾塑性論にもとづき解析的に検討した結果、次のようなことが明らかとなった。

1)変動水圧によるブロック外縁地盤の盛り上がりを解析的に説明することができた。

2)ブロック外縁に大きな間隙水圧の勾配が生じ、波の繰り返しによってせん断歪が増大する。

2)ブロックの透水性、比重を大きくするとブロック周辺地盤は安定になる。

このように、従来の研究で行われていた弾性論によるものと異なり、波浪の繰り返し作用による地盤変位、歪の増大、それに伴う地盤強度の低下が表現でき興味深い結果が得られた。

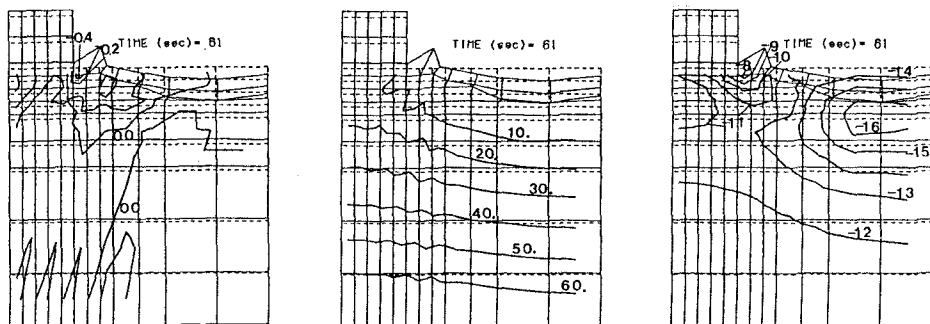


(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m$

(c)間隙水圧  $p_m$

(i) case. 2

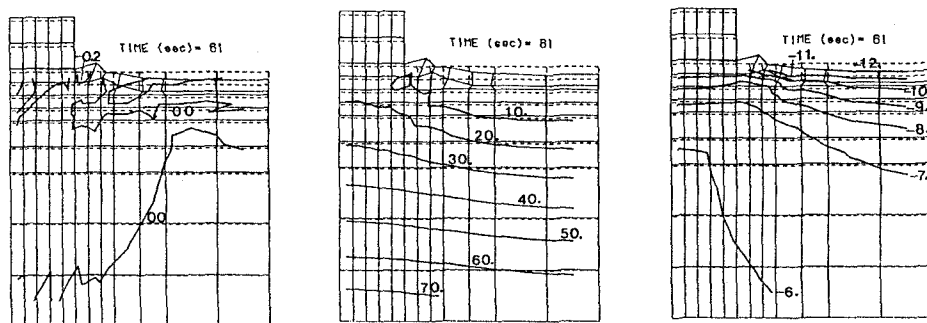


(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m$

(c)間隙水圧  $p_m$

(ii) case. 3

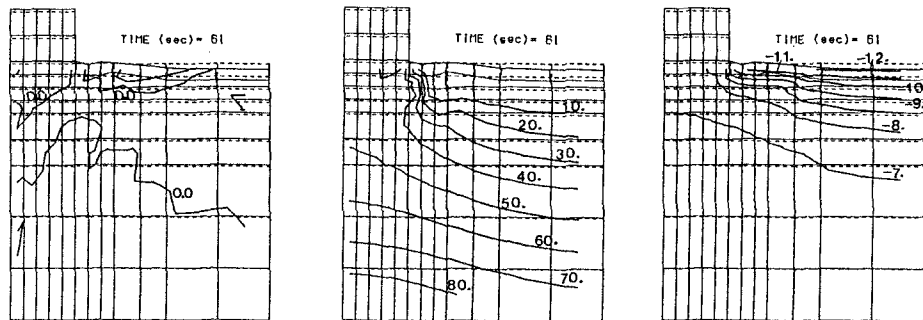


(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m$

(c)間隙水圧  $p_m$

(iii) case. 4



(a)せん断歪  $\gamma$

(b)平均有効応力  $\sigma_m$

(c)間隙水圧  $p_m$

(iv) case. 5

図-7 海底地盤、ブロックの特性による地盤挙動の変化

FIGURE SCALE(m) 0 2 DEFORATION SCALE(cc) 0 1

参考文献

1) 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤(1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, 第26巻, 4号,

pp.125-180 .

- 2) Yamamoto, T., Koning, H., Sellmeier, H. and Hijum, E.V. (1987): On the response of aporo-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol.87, No.1, pp.193-206.
- 3) 名合宏之(1984): 変動水圧による砂層の液状化と局所洗掘防止に関する研究, 昭和58年文部省科学研究費・自然災害特別研究(1) 研究成果報告書, pp.1-29.
- 4) 前野賀彦・酒井哲郎・間瀬 肇(1988): 波浪による砂層の液状化傾向と波形勾配の関係, 海洋開発論文集, 4, pp.5-10.
- 5) 酒井哲郎・服部明彦・間瀬 肇(1989): 波浪による砕波帯海底地盤の有効応力ゼロ領域の発生, 海洋開発論文集, 5, pp.79-84.
- 6) Kuwahara H. and Tamai S. (1991): Effect of asymmetric wave pressure variation on seabed response, International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, -Theory and Practice on Soft Ground- (GEO-COAST'91), pp.585-590.
- 7) 名合宏之・前野詩朗・佐々原秀史・西岡 操(1990): 海岸ブロックの沈下防止法に関する研究, 海洋開発論文集, 6, pp.229-234.
- 8) 柴田 徹ら(1990): 2次元液状化プログラムの開発に関する調査・研究, 防災研究協会, 183pp.
- 9) Akai, K., et. al. (1988): A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand, Constitutive equations for granular noncohesive soils, Ed. by Saada & Bianchini, Balkema, pp.101-114.