

## 波浪による海底地盤中の応力変化に関する現地観測

運輸省港湾技術研究所 正会員 ○善 功企  
同 上 山崎浩之  
同 上(研修生) 佐藤 泰

### 1. まえがき

近年、砂地盤上の離岸堤や異形ブロックなどが、海底地盤中に沈み込んでいる事例が報告されている<sup>1)</sup>。従来は、この原因が、波浪による海底地盤の洗掘や砂の吸出しなどによるものと説明されていたが、必ずしもこのような解釈では、ブロックが地盤中に深く沈み込んでいる状況は説明できない。筆者らは、このような原因が、地盤の波浪による液状化とそれにとまなう地盤の支持力不足に起因するとの仮説のもとに、室内実験を行い、異形ブロック等の重量構造物が砂地盤中に沈み込んでいく現象を確認した<sup>2)</sup>。

液状化を引起す重要な要因である地盤中の間隙水圧については、これまで、実際の海域や水槽実験等においていくつかの観測・実測例が報告されている<sup>2)-5)</sup>。しかしながら、これらの報告では、地盤中の有効応力変動と液状化現象の相関性についてはあまり明確にされておらず、特に、実海域における液状化現象については、いまだ確認されていない現状にある。

以上のような背景から、本研究は、現地における海底地盤中の過剰間隙水圧、応力変動等を観測することによって、実際の海域における液状化現象を確認するとともに、筆者らが提案している液状化理論の妥当性を検証することを目的として行ったものである。本報文では、上記の目的で行った研究結果の一部について報告する。

### 2. 波浪による液状化理論

海底地盤の液状化現象を解析する場合、まず、海底地盤中の有効応力を求める必要がある。任意の深度における有効鉛直応力 $\sigma'_v$ は、海底地盤表面に作用する水圧の静穏時からの変動量を $p_b$ とし、海底地盤中の変動間隙水圧を $p_m$ とすると、次式で与えられる。

$$\sigma'_v = \sigma'_{v_0} + (p_b - p_m) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma'_{v_0}$ は、静穏時の有効土被り圧で、 $p_b$ および $p_m$ は、静穏時の静水圧からの増分を正とする。式(1)において、 $-(p_b - p_m)$ は、地盤中の過剰間隙水圧を意味し、筆者らは、これを変動過剰間隙水圧とよんでいる。 $p_b = p_m$ となる場合には、変動過剰間隙水圧は0となり、水圧の変動による有効鉛直応力 $\sigma'_v$ の変動はみられないが、 $p_b \neq p_m$ の場合には、 $\sigma'_v$ は、変動過剰間隙水圧に依存して変動する。

海底地盤の液状化は、上記、有効鉛直応力 $\sigma'_v$ が0または負となる場合に発生すると考えられることから、液状化の発生条件は、

$$\sigma'_{v_0} \leq -(p_b - p_m) \quad (2)$$

で与えられる。したがって、液状化現象を支配する要因は、静穏時の有効土被り圧 $\sigma'_{v_0}$ 、海底地盤表面に作用する水圧の静穏時からの変動量 $p_b$ 、海底地盤中の変動間隙水圧 $p_m$ の3つと考えられる。

さて、式(2)における $\sigma'_{v_0}$ は、海底表面の上載荷重による地盤中の有効応力を $\sigma'$ 、地盤の水中単位体積重量を $\gamma'$ 、地盤面からの深度を $z$ とすると、次式で与えられる。

$$\sigma'_{v_0} = \gamma' z + \sigma' \quad (3)$$

海底地盤中の変動間隙水圧 $p_m$ については、次式で示すBiot型の基礎方程式が提案されている<sup>2)</sup>。

$$C_v \cdot \partial^2 p_m / \partial z^2 = \alpha \cdot \partial p_m / \partial t - \partial p_b / \partial t \quad (4)$$

ここに、 $C_v$ : 圧密係数 ( $= k / (\gamma_w \cdot m_v)$ )、 $\alpha$ : 伝達係数 ( $= 1 + n \cdot m_w / m_v$ )、 $k$ : 土の透水係数、 $m_v$ : 土の体積圧縮係数、 $\gamma_w$ : 水の単位体積重量、 $n$ : 間隙率、 $m_w$ : 間隙水の圧縮率、 $t$ : 時間、 $z$ : 深度方向の座標である。初期条件および境界条件は、 $t=0$ で $p_m=0$ 、 $z=0$ で $p_m=p_b$ 、 $z=1$ で $\partial p_m / \partial z=0$ で与えられる。式(4)において、 $p_b$ の波形は任意であるから、不規則な海底地盤表面の水圧変動に対しても適用される。不規則波形に対する本理論の適用については5.で述べているが、理論的取扱を簡単にするために、微小振幅波

を仮定すると、 $p_0$  は、式(5)で与えられる。

$$p_0 = p_m \cdot \sin(\lambda x - \omega t) \quad (5)$$

ここに、 $p_0$ ：海底面上の水圧変動振幅 ( $=\gamma_w \cdot H/2\cos(\lambda h)$ )、 $H$ ：波高、 $h$ ：水深、 $\omega$ ：角振動数 ( $=2\pi/T$ )、 $\lambda$ ：波数 ( $=2\pi/L$ )、 $T$ ：周期、 $L$ ：波長、 $x$ ：水平方向座標である。一次元の場合、式(5)の $\lambda x$ の項は考慮しなくてもよい。この場合、式(4)は、 $C=C_v \cdot T/l^2$ 、 $\bar{Z}=z/l$ 、 $\bar{T}=t/T$ 、 $\bar{P}=p_m/p$ 。とおくことにより、以下のように無次元化される。

$$C \cdot \partial^2 \bar{P} / \partial \bar{Z}^2 = \alpha \cdot \partial \bar{P} / \partial \bar{T} + 2\pi \cos(2\pi \bar{T}) \quad (6)$$

初期条件および境界条件は、 $\bar{T}=0$  で  $\bar{P}=0$ 、 $\bar{Z}=0$  で  $\bar{P}=\sin(2\pi \bar{T})$ 、 $\bar{Z}=1$  で  $\partial \bar{P} / \partial \bar{Z}=0$  となる。ここに、 $C$ は、排水係数とよばれ、排水の難易を表す無次元定数である。式(6)において、 $\bar{P}$ は、前述の伝達係数 $\alpha$ と排水係数 $C$ に支配される。したがって、係数 $\alpha$ と $C$ が実験的に求まれば、ある波浪条件と地盤条件のもとでの液状化の判定が可能となる。

実際の現地観測においては、式(3)で表される静穏時の有効土被り圧 $\sigma'_v$ と変動過剰間隙水圧 $-(p_0 - p_m)$ を測定し、式(2)を用いて液状化の判定を行っている。また、式(4)を用いて、変動間隙水圧の現地観測結果と理論値の比較を試みている。

### 3. 現地観測

#### 3.1 観測場所

現地観測は、茨城県鹿島郡須田浜地先の港湾技術研究所「波崎海洋研究施設 (HORF)」において実施した。本施設は、図-1に示すように、海岸から427m沖合に延びた橋樑構造の施設である。観測地点は、この橋樑の先端付近の水深約4mの地点である。2.で述べたように、波浪による液状化現象は、海底表層部に現れることが予想されることから、観測は、海底面から約2m以浅の浅い部分を対象としている。

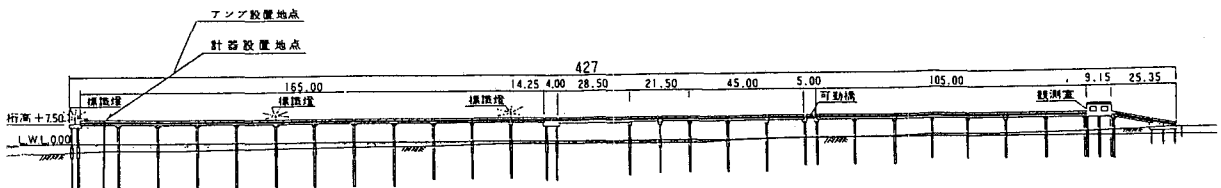


図-1 波崎海洋研究施設

#### 3.2 観測地点の地盤

観測地点の地盤は、図-2の土層断面図に示すように、沖積細砂層 ( $A_{s1}$ )、沖積中砂～細砂層 ( $A_{s2}$ )、洪積細砂層 ( $D_{s1}$ )、洪積礫混じり砂層 ( $D_{s2}$ ) からなる。細砂層 ( $A_{s1}$ ) は、黄灰色の緩く堆積した砂層で、 $N$ 値は6～8程度である。沖積中砂～細砂層 ( $A_{s2}$ ) は、層厚4m～8m程度で、 $N$ 値は21～50以上の黄灰色～暗灰色をした砂層である。観測の対象とした砂層は、海底表層部分の沖積細砂層 ( $A_{s1}$ ) である。この砂層は、図-3の粒径加積曲線に示すように、一般の海浜の砂と同様、粒径の比較的均一な砂からなる。原位置における表層部の砂の密度を測定したところ、水中単位体積重量換算で平均  $0.969 \text{ gf/cm}^3$ 、比重は、2.689であった。

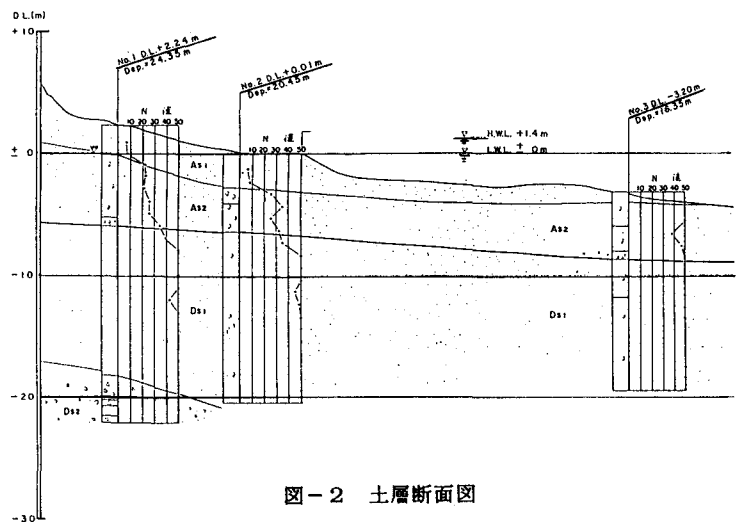


図-2 土層断面図

#### 3.3 観測の方法

##### (1) 項目および計器

観測項目は、波高、流速、潮位、海底地盤表面の水圧変動および海底面の移動、地盤中の間隙水圧変動である。

図-4に観測用の計器埋設位置を示している。波高は、棧橋上に設置した超音波式の波高計により観測している。

#### (2)機器の設置方法

機器を支える鋼管支柱（外径 216.3mm、肉厚 12.7mm、長さ 5.5m）を、ウォータージェットを用いて海底地盤中約5mまで打込んだ。鋼管支柱の上部にはH鋼を取り付け、棧橋のPC桁にアンカーボルトで固定した。図-4に示したように、その支柱から1mの距離まで水平にパイプを張り出し、ウォータージェットにより埋設した間隙水圧計等の機器を固定した。センサーからのケーブルは、水平パイプおよび鋼管支柱にそれぞれ、ステンレスバンドで固定しながら棧橋上へ上げた。棧橋に敷設してある送信ケーブルを通して、信号を観測室へ送信するために、鋼管支柱の上部にアンプボックスを設置した。

#### (3)データの取得および記録

データの取得は、機器設置後、地盤の乱れが落ち着くまでしばらくの期間放置した後、波高の大きな時期を待って、20分間の観測を1単位とし、2時間ごとに24時間継続して行った。観測データは、データレコーダとパーソナルコンピュータにデジタルもしくはアナログデータとして取込んだ。記録されたデータは、研究室に持込み、パーソナルコンピュータによって処理・解析した。

### 4. 室内実験

#### 4.1 実験方法

液状化現象を室内で確認する目的で、現地観測と平行して、原位置から採取された波崎砂を用いて室内液状化実験を実施した。実験に使用した装置は、変動水圧型液状化試験装置<sup>2)</sup>である。この装置に、試料長 188cm、乾燥密度  $1.41\text{g/cm}^3$  前後となるように波崎砂を詰めた。水深 5m 地点の地盤を想定し、静水圧として、 $0.5\text{kgf/cm}^2$  を加え、その状態で、表-1に示す周期  $T$  と振幅  $p$  を有する正弦波形の水圧変動を载荷した。一つの地盤に対して、段階的に载荷条件を変化させるいわゆるステージテストを採用した。各ステージの波の数は、500波である。測定項目は、各深度の間隙水圧、地盤表面沈下量、地盤中の鉛直ひずみ、载荷前後の密度変化、飽和度等である。また、本試験とは別に、排水係数  $C_v$  もしくは圧密係数  $C_v$  を求めるため、透水試験、一次元圧縮試験も実施している。

#### 4.2 実験結果

図-5は、ステージ No.4における波数10波のときの無次元深度  $z/l=0, 0.45, 1.0$  における水圧比  $p_m/p_0$  を示したものである。図-5から明らかなように、地盤中の間隙水圧比は、従来の結果と同様、ある減衰と位相をもって伝達されている。図-6～図-7は、同じくステージ No.4における  $(p_0 - p_m)$  および  $\sigma'_v$  (式(1)による)の深度分布を描いたものである。図-6～図-7によると、位相  $\phi = 250^\circ$  で明らかに液状化が発生していることが確認される。

#### 4.3 排水係数および伝達係数

現地観測の結果を理論的に解析しようとする場合、前述のよ

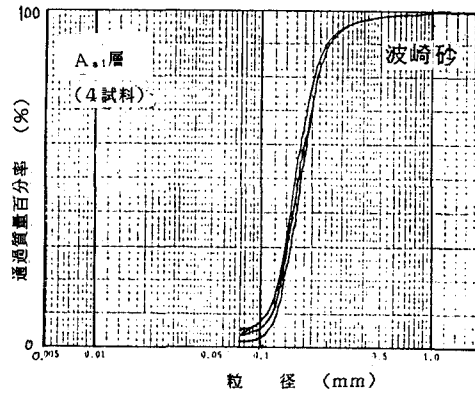


図-3 粒径加積曲線

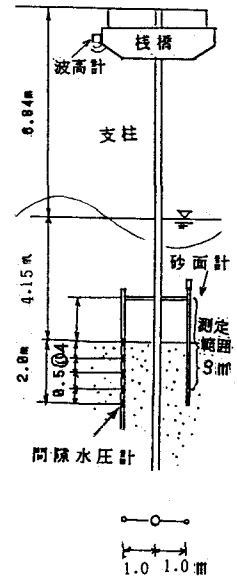


図-4 計器埋設位置

表-1 载荷条件

| Stage No. | 周期 $T$ (s) | 振幅 $P_0$ (kgf) | $2\bar{P}_0$ (kgf) | 試料長 $L$ (cm) |
|-----------|------------|----------------|--------------------|--------------|
| 1         | 3          | 0.074          | -0.061             | 0.135        |
| 2         | 5          | 0.118          | -0.113             | 0.231        |
| 3         | 7          | 0.161          | -0.157             | 0.318        |
| 4         | 8          | 0.213          | -0.208             | 0.421        |
| 5         | 7          | 0.180          | -0.157             | 0.317        |
| 6         | 5          | 0.115          | -0.112             | 0.227        |
| 7         | 3          | 0.070          | -0.062             | 0.132        |

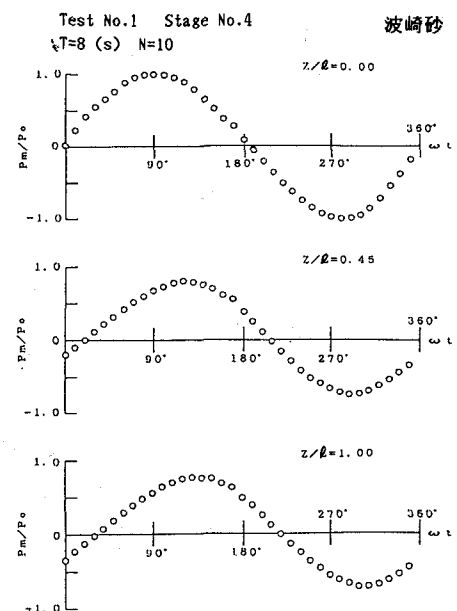


図-5 間隙水圧比

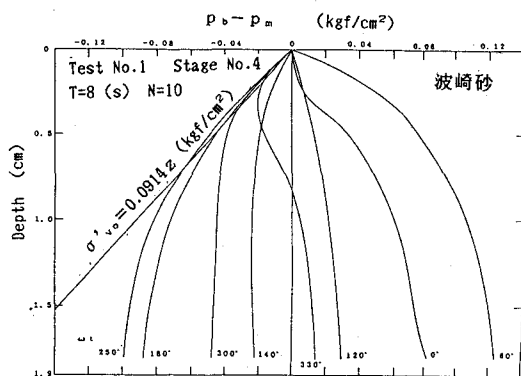


図-6 有効鉛直応力の変動

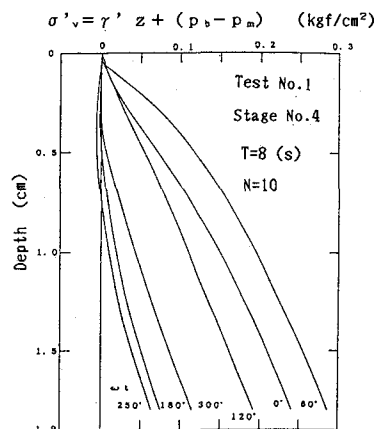


図-7 有効鉛直応力分布

うに、排水係数（もしくは圧密係数）と伝達係数を求める必要がある。3～4種類の密度に対して、透水試験と一次元圧縮試験を実施し、それぞれ  $k$ 、 $m_v$  を測定したところ、室内液状化実験に対応する乾燥密度  $1.41 \text{ g/cm}^3$  に対して、 $k = 2.24 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $m_v = 1.945 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ 、 $C_v = 11.517 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  が得られた。層厚  $l$  と周期  $T$  から、各ステージごとの排水係数  $C$  を定め、それらの  $C$  に対して伝達係数  $\alpha$  を求めた。 $\alpha$  については、図-8の例に示すような室内試験結果と理論解析結果とのフィッティング法により求めたが、その結果、 $\alpha$  は2前後の値であった。なお、現地の乾燥密度  $1.54 \text{ g/cm}^3$  に対応する圧密係数は、 $C_v = 7.18 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  であった。

## 5. 現地観測結果および考察

### 5.1 波浪特性

観測期間中（昭和63年の4月12日1:00～4月14日0:00、4月19日1:00～4月20日0:00、5月9日1:00～5月13日0:00）の波浪特性について、有義波高  $H_{1/3}$  と有義波周期  $T_{1/3}$  の関係を描いたものが図-9である。図-9によると、有義波高が  $100 \text{ cm}$  以上の波の有義波周期は、 $6 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$  程度となっている。

### 5.2 観測記録例

現地観測で得られた結果の一例を図-10に示す。図-10は、昭和63年

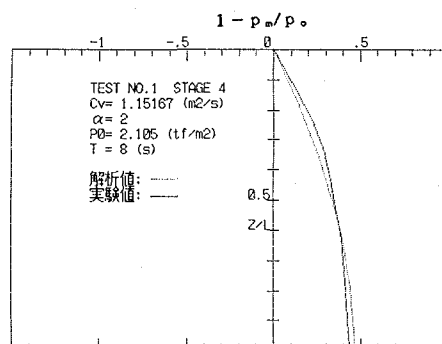


図-8 伝達係数のフィッティング

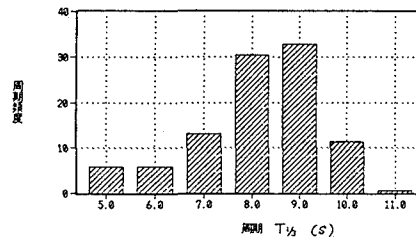
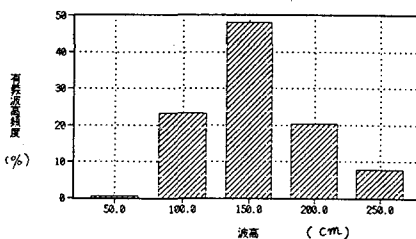
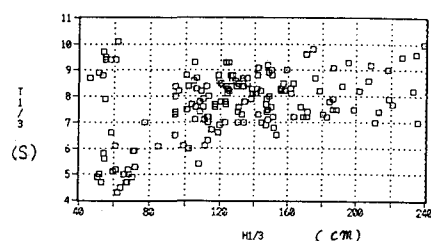


図-9 波浪特性

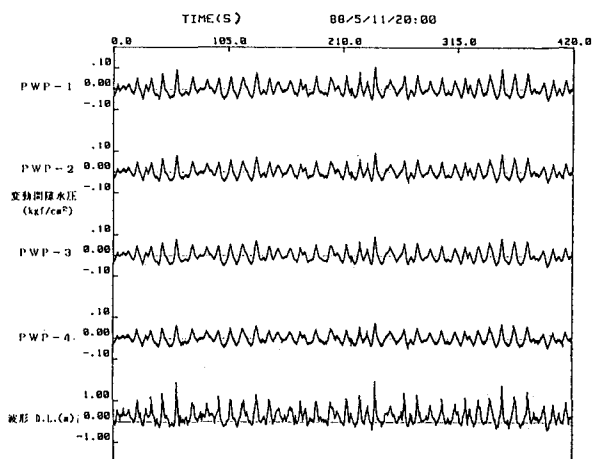


図-10 観測記録例

5月11日20:00から7分間（420秒間）のデータを示したものであるが、変動間隙水圧の経時変化を逐一追跡するため、図-10のデータから、大きな波高が観測されている 20.0秒～130.0秒までの間のデータを拡大したものが図-11である。ここでは、これらの代表的な波10波（波の番号(WAVE:No.3～12)）について詳細な考察を加えることにする。

### 5.3 変動間隙水圧

海底地盤中の変動間隙水圧については、既に、観測の一部が報告されており<sup>6)</sup>、海底地盤中の間隙水圧の変動は、海底表面の水圧変動に対して、ある減衰と位相をもって変動し、 $p_m \neq p_b$ であることが確認されている。図-12は、図-11から、各波の番号に対応する変動間隙水圧  $p_m$  と海底面の水圧変動のピーク時の値  $p_b$  との比  $p_m/p_b$  について描いたものである。これらの結果からも、 $p_m/p_b$  は1.0 以下となっており、 $p_m \neq p_b$  であることが明らかである。このような場合、式(1)に示したように、地盤中の鉛直有効応力も変動していると考えられる。

### 5.3 海底地盤中の応力変動と液状化

海底地盤中の有効鉛直応力の変動は、 $(p_b - p_m)$  で求められる。図-13は、波の番号7について、波の峰、谷および静水面に相当するときの  $(p_b - p_m)$  の深度分布を描いたものである。図-13によると、 $(p_b - p_m)$  は、 $p_b - p_m = 0$  に対して正および負の側に変動していることが分る。図-14は、図-11に示した10個の波について、 $(p_b - p_m)$  が最小となるときにの深度分布を描いたもので、PWP-2～PWP-4の3点における実測値を直線で結んだものである。また、地盤の静穏時における有効鉛直応力  $\sigma'_{v0} = 0.969 \times 10^{-3} \text{ z}$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ) についても破

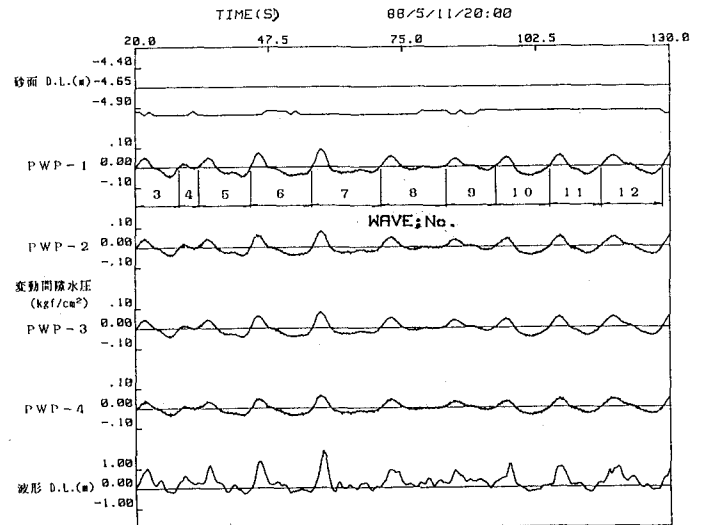


図-11 観測記録の拡大図

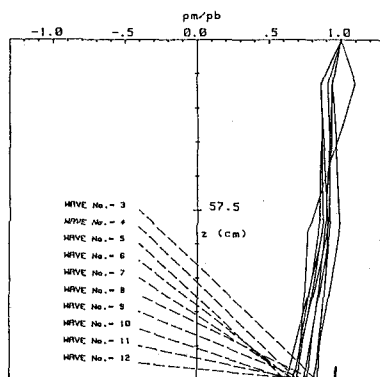


図-12 水圧比の分布

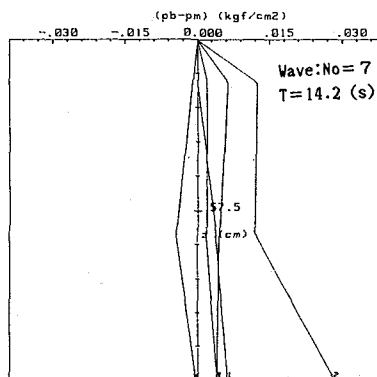


図-13 有効鉛直応力の変動

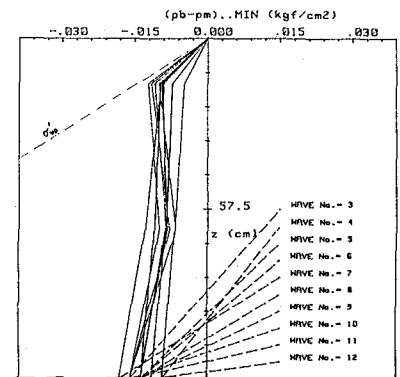


図-14  $(p_b - p_m)$  の最小値の分布

線（符号は逆）で示している。図-14において、深度約 15 cm 以浅においてほぼ実線と破線が一致しているところが存在する。このことは、式(2)からも明らかなように、海底地盤の表層部付近において液状化が発生していることを意味するものである。海底表層部地盤がこのような状態になれば、表層部のせん断抵抗力が著しく低下することや、砂粒子が海底の流れ等によって輸送され易くなることは明らかであり、海底地盤の液状化現象は、異形ブロック等の沈み込みや、砂地盤の洗掘現象の発生を容易にする一つの原因と考えられる。

### 5.4 不規則波に対する理論値と観測値の比較

現地観測により得られた海底面の水圧波形は、図-11に示したように、必ずしも微小振幅波により表されるものではなく、不規則な波形をしている。筆者らの提案する海底地盤中の変動間隙水圧に関する基礎方程式(5)は、このような不規則波に対しても適用されることから、提案式による理論解を現地観測結果と比較することにより、理論の妥当性について検証した。理論解析にあたって必要な入力定数  $C_v$  と  $\alpha$  については、室内実験から得られた  $C_v = 7.18 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $\alpha = 2.0$  を用いた。解析は差分法によった。境界条件としての海底地盤表面の水圧は、

図-11の観測値 (PWP-1: CH=1) を用いた。図-15は、図-11に示した観測結果と理論解析結果を比較したものである。図-15をみると、観測値と理論値は良く一致している。図-16、図-17は、波の番号7に対する水圧比  $p_m/p_b$  および有効応力の減少量  $(p_b - p_m)_{MIN}$  の深度分布を比較したものであるが、理論値はほぼ妥当な値を与えている。図-15～図-17の結果は、2. で述べた筆者らの提案理論の妥当性を裏付けるものと考えられる。

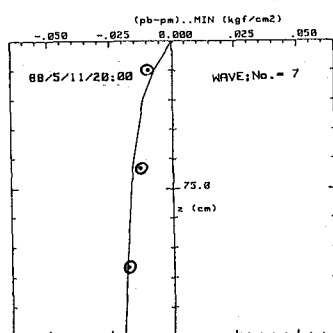


図-16  $(p_b - p_m)$  の最小値の比較

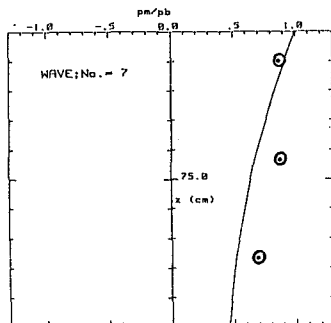


図-17 水圧比の比較

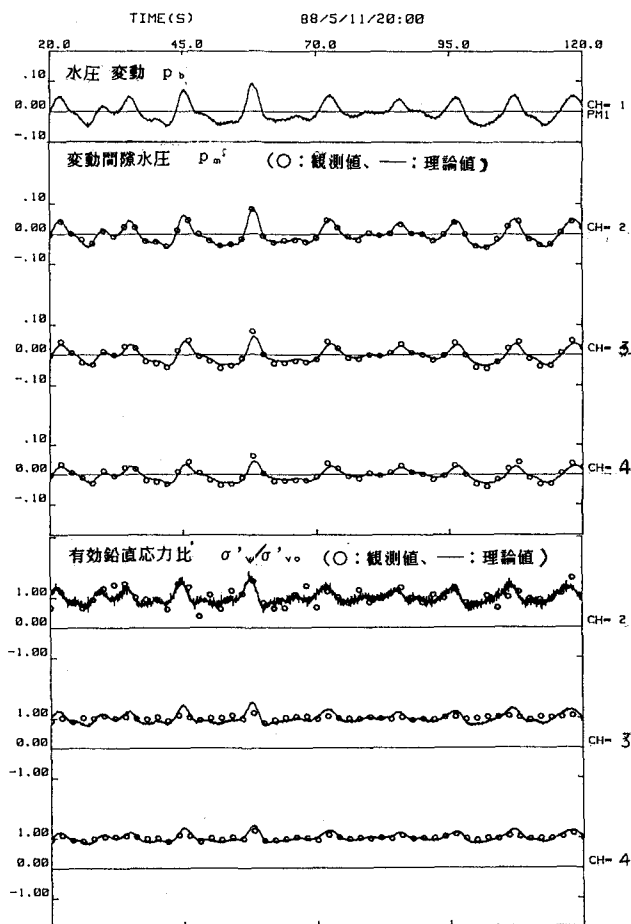


図-15 変動間隙水圧および応力比の観測値と理論値の比較

## 6. あとがき

本報告では、海底地盤の液状化現象を、現地観測により実際に検証した結果について述べた。ここで導かれた主要な結論をまとめると以下ようになる。

(1) 海底地盤中において、有効鉛直応力が0となる、すなわち、液状化する領域が存在することが現地観測により確認された。

(2) 筆者らが提案している液状化の予測理論の妥当性が、実際の海底地盤においても検証された。

## 参考文献

- 1) 西田仁志、山口 豊、近藤豊次、清水謙吉(1985): 孔間弾性波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) 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、港湾技研報告、第26巻、第4号、pp.125-180.
- 3) Okusa, S., Nakamura, T. and Fukue, M. (1984): "Measurements of wave-induced pore pressure and coefficient of permeability of submarine sediments during reversing flow", Proc. IUTAM'83 Symposium, Seabed Mechanics, pp.113-122.
- 4) Maeno, Y. and Hasegawa, T. (1985): "Evaluation of wave-induced pore pressure in sand layer by wave steepness", Coastal Engineering in Japan, Vol.28, pp.31-44.
- 5) 清水正喜、川崎尚弘、岩成敬介、野田英明(1986): 海浜砂層内の間隙水圧の挙動、鳥取大学工学部研究報告、第17巻、第1号、pp.111-119.
- 6) 善 功企、山崎浩之、佐藤 泰(1989): 海底地盤中の変動間隙水圧の現地観測、第24回土質工学研究発表会、土質工学会、投稿中