

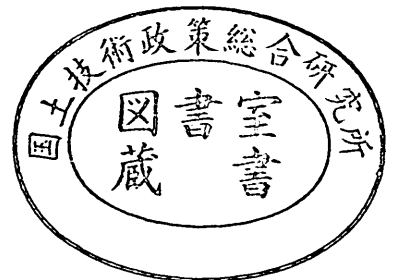
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28 NO. 3 SEPT. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第3号 (Vol. 28, No. 3), 1989年9月 (Sept. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 共振集波効果を応用した直立消波ケーソンの原理と水理特性
..... 高橋重雄・木村克俊・田中 智..... 3
(Wave Concentration Principle and Its Application for a New
Wave Absorbing Caisson
..... Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA and Satoru TANAKA)
2. 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—
..... 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....29
(Wave-induced Liquefaction in Seabed—Field Observation and Analysis—
..... Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
3. 遠心模型実験の計画と結果の信頼性—支持力に関する国際比較実験例—
..... 寺師昌明・遠藤敏雄・北誥昌樹.....59
(Planning of Model Tests and Reliability of Test Results
—Bearing Capacity of a Circular Foundation on Sand—
..... Masaaki TERASHI, Toshio ENDOH and Masaki KITAZUME)
4. 一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法
..... 土田 孝・水上純一・及川 研・森 好生.....81
(New Method for Determining Undrained Strength of Clayey Ground
by Means of Unconfined Compression Test and Triaxial Test
..... Takashi TSUCHIDA, Jun-ichi MIZUKAMI, Ken OIKAWA and Yoshio MORI)
5. 腐食鋼矢板の補修工の耐力特性..... 清宮 理・野口孝俊・横田 弘... 147
(Mechanical Properties of Repaired Steel Sheet Piles
..... Osamu KIYOMIYA, Takatoshi NOGUCHI and Hiroshi YOKOTA)

2. 海底地盤の波浪による液状化 —現地観測および解析—

善 功企*・山崎 浩之**・佐藤 泰***

要 旨

本研究は、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を検証し、さらには、それらの結果にもとづき液状化の予測手法を提案することを目的としている。

本研究の内容は、①現地観測、②現地試料の特性把握実験、③現地観測記録の理論解析の3つの部分からなる。現地観測では、2年間にわたり、波高、海底地盤表面の水圧変動、海底地盤中の変動間隙水圧、地中応力、海底砂面の移動などを観測している。現地試料の特性把握実験では、海底地盤表層部の密度測定と、現地で採取された波崎砂を用いた室内透水試験、一次元圧縮試験、変動水圧型液状化試験等を実施し、理論解析に必要な定数を決定した。理論解析では、筆者らの提案している液状化理論にもとづき解析を行い、現地観測データとの比較検討を行っている。

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 波浪の作用を受ける実海域の海底砂地盤中においては、有効鉛直応力が波の変動にともない逐一変動している。
- (2) 上記有効鉛直応力の変動量は、海底地盤表面の水圧変動と海底地盤中の変動間隙水圧の差として表される。
- (3) 実海域においても、波浪の作用によって海底地盤中の有効鉛直応力が0となる、すなわち、海底地盤が液状化する領域が存在する。
- (4) 海底地盤中の変動間隙水圧および有効鉛直応力変動について、観測結果と理論解析結果を比較したところ、両者は良い一致を示し、筆者らが提案している変動間隙水圧に関する基礎方程式の妥当性が、破波帯内の不規則波に対しても検証された。
- (5) 以上の結果にもとづき、実海域における波浪による液状化現象の予測手法を提案した。

キーワード：海岸，現地観測，海底土，液状化，間隙圧，波動

* 土質部 動土質研究室長
** 土質部 動土質研究室
*** 土質部 動土質研究室 研修生(日本国土開発院)

2. Wave-induced Liquefaction in Seabed —Field Observation and Analysis—

Kouki ZEN*
Hiroyuki YAMAZAKI**
Yasushi SATO***

Synopsis

The purposes of the study are 1) to observe the wave-induced liquefaction in the oceanic seabed, 2) to verify the liquefaction theory proposed by the Authors and 3) to propose a method to evaluate the liquefaction potential in the seabed.

This study consists of the field observation, laboratory tests and theoretical analysis of the field data. In the field observation, the sea bottom pressures, the fluctuating pore pressures and stresses in the seabed and the changes of the water depth are observed for tow years. The necessary data for the theoretical analysis are determined from the laboratory tests executed with Hazaki sand obtained from the site. The liquefaction theory proposed by the Authors is verified by comparing the calculated fluctuating pore pressures with those observed in the field.

The major conclusions obtained in this study are as follows:

- 1) The effective vertical stress in the seabed varies in accordance with the propagation of water waves.
- 2) The variation of the effective vertical stress is identical to the difference between the wave-associated bottom pressure and the fluctuating pore pressure in the seabed.
- 3) The wave-induced liquefaction in the ocean bottom is confirmed by the field observation
- 4) The basic equation proposed by the Authors explains the behaviour of the fluctuating pore pressure observed in the seabed very well. The theory can be applicable to the irregular waves in the breaking wave zones as well as the linear waves.
- 5) A method evaluating the liquefaction potential is proposed on the basis of the aforementioned results.

Key Words: Coast, Field Observation, Ocean Soil, Liquefaction, Pore Pressure, Wave Propagation

* Chief of Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division.

** Member of Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division.

*** Trainee of Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division.

目 次

要 旨	29
1. ま え が き	33
2. 波浪による液状化理論	33
2.1 既往の研究	33
2.2 筆者らの理論	33
3. 波崎砂の液状化特性	34
3.1 実験概要	34
3.2 実験結果	35
4. 現地観測概要	38
4.1 観測場所	38
4.2 地盤特性	38
4.3 観測方法	39
5. 現地観測結果	41
5.1 波浪特性	41
5.2 変動間隙水圧	41
5.3 地中応力の変動	45
6. 海底地盤の液状化に関する考察	46
6.1 変動過剰間隙水圧と有効応力	46
6.2 液状化の判定	48
7. 提案理論の検証および考察	49
7.1 理論解析方法	49
7.2 室内実験による入力定数の決定	50
7.3 観測値と理論値の比較	53
8. 波浪による液状化の予測方法	54
9. 結 論	55
参 考 文 献	56
記 号 一 覧 表	56

1. まえがき

砂地盤上の離岸堤や異形ブロックなどが長年にわたり海底地盤中に沈み込んでいる事例が報告されている¹⁾。一般には、このような現象を引起す原因が、洗掘や砂の吸出しなどに起因すると理解されている。しかしながら、このような沈み込み現象については、必ずしも洗掘といった現象論的概念のみでは説明できないことが次第に明らかになりつつある。本来、洗掘などに代表される波浪と海底地盤の境界領域の問題は、海底地盤そのものの安定問題に帰結すると考えられることから、上記のような問題については、地盤の挙動に重点を置いた土質工学的観点からの取組みが必要であると考えられる。

筆者らは、上述のような考えにもとづき、これまで、波浪に対する海底地盤の液状化問題に取り組んできたが、これまでの研究によると、海底砂地盤が波浪により液状化する可能性があること、洗掘やブロックの沈み込み現象が液状化と密接な関連があることなどが明らかにされている。さらには、液状化に対して支配的な要因は、海底地盤表面の水圧変動、海底地盤中の間隙水圧変動および海底地盤中の静隠時の有効鉛直応力であることが解明されている²⁾⁻⁴⁾。

これまでの研究は、主として室内実験および理論的研究にもとづくものであるが、実際の海域における過剰間隙水圧の発生や有効応力の変動に関する詳細な観測は実施されておらず、実海域において果たして液状化現象が発生するのかどうかという点に関し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、実際の海域における液状化現象を観測するとともに、筆者らが提案している液状化理論を検証し、さらには、それらの結果にもとづき液状化の予測手法を提案することを目的として行ったものである。本報告では、2年間の現地観測結果とそれらの理論解析結果が報告されている。

2. 波浪による液状化理論

2.1 既往の研究

海底地盤の波浪による液状化問題を取扱う場合、地盤中の間隙水圧を正確に把握する必要がある。波浪により生じる地盤中の間隙水圧については、これまでいくつかの報告があり、これらの研究で用いられている基礎方程式は間隙水および土粒子骨格の圧縮性の評価法の違いによって、① Laplace 型の基礎方程式⁵⁾⁻⁷⁾ (間隙水および土粒子骨格の圧縮性：無視)、② Terzaghi 型の基礎方程式⁸⁾ (間隙水の圧縮性：無視、土粒子骨格の圧縮性：

考慮)、③ Biot 型の基礎方程式⁹⁾⁻¹¹⁾ (間隙水および土粒子骨格の圧縮性：考慮)に分類される。最近の研究成果によると、海底地盤中の間隙水圧に関しては、Biot 型の基礎方程式の適用性が高いことが明らかになっている。これまで発表されている Biot 型の基礎方程式を一般的に表示すると、

$$Q \cdot \nabla^2 p_m = R \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} + S \cdot \frac{\partial q}{\partial t} \quad \dots\dots(1)$$

となる。ここに、 p_m ：地盤中の間隙水圧の静水圧からの変動量 (ここでは、変動間隙水圧とよぶ)、 q ：土粒子骨格の体積ひずみ ϵ_v もしくは有効応力 σ' など、 t ：時間である。 Q, R, S は地盤特性を表す定数で、間隙水および土粒子骨格の圧縮性の評価法の違いによって異なった表現となる。

式(1)の右辺には、土粒子骨格の体積ひずみもしくは有効応力等の項が存在するが、これらと変動間隙水圧の関係

$$q = f(p_m) \quad \dots\dots(2)$$

を用い、適切な初期条件、境界条件を設定することによって、地盤中の有効応力、ひずみなどが理論的に求められる。

上記の理論的研究では、地盤中の有効応力が0もしくは負となる場合がみられることから、海底地盤の液状化の可能性を示唆したものもある。ただし、これらの弾性解析では、地盤中の変動間隙水圧 p_m は求められているものの、“過剰”間隙水圧については明確に示されていない。したがって、弾性応力が0もしくは負となったとしても、そのこと自体が直接液状化現象と結びつくかどうかは不明である。すなわち、地盤の弾性応力解などで、引張応力が現れることは良くあることであるが、引張応力の存在そのものは液状化とはなんら直接的な関係はない。式(1)により得られる p_m は、波浪による地盤中の変動間隙水圧を意味するものであって、液状化に対して重要な役割を果す“過剰”間隙水圧そのものを意味するものではない。一部の報告では、この変動間隙水圧と過剰間隙水圧を混同しているものもあり注意を要する点である。以上のように、海底地盤の液状化のメカニズムを考えるうえでは、地盤中の“過剰”間隙水圧と有効応力の関係を十分考慮したアプローチが不可欠と思われる。

2.2 筆者らの理論

上記のような考えにもとづき、筆者らは、新たな液状化理論を提案し、室内実験により理論の検証を行っているが、以下にその概要について述べる。

海底地盤の液状化現象を解析する場合、まず、海底地盤中の過剰間隙水圧もしくは有効応力を求める必要があ

る。海底地盤表面に作用する水圧の、静隠時からの変動量を p_b とし、海底地盤中の変動間隙水圧を p_m とすると、地盤中には過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ (筆者らは、これを変動過剰間隙水圧とよんでいる) が励起されている。このとき、任意の深度における有効鉛直応力 σ_v' は、次式で与えられる。

$$\sigma_v' = \sigma_{v0}' + (p_b - p_m) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 σ_{v0}' は、静隠時の有効土被り圧で、 p_b および p_m は、静隠時の静水圧からの増分を正とする。式(3)から、地盤中の有効鉛直応力の変動量 $\Delta\sigma_v'$ は、

$$\Delta\sigma_v' = (p_b - p_m) \quad \dots\dots(4)$$

となる。 $p_b = p_m$ 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の変動はみられないが、 $p_b \neq p_m$ の場合には、 $\Delta\sigma_v'$ は、変動過剰間隙水圧に依存して変動する。すなわち、海底面の水圧変動が地盤中の変動間隙水圧よりも小さい ($p_b < p_m$) とときは、 $-(p_b - p_m) > 0$ 、 $\Delta\sigma_v' < 0$ となり、有効鉛直応力は減少する。これは、地盤中に正の過剰間隙水圧が蓄積された状態を意味する。一方、海底面の水圧変動が地盤中の変動間隙水圧よりも大きい ($p_b > p_m$) とときは、 $-(p_b - p_m) < 0$ 、 $\Delta\sigma_v' > 0$ となり、有効鉛直応力は増加する。これは、地盤中に負の過剰間隙水圧が発生して、土粒子を圧縮する有効応力が作用していることを意味する。

さて、海底地盤の液状化条件は、上記、有効鉛直応力 σ_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、

$$\sigma_v' \leq -(p_b - p_m) \quad \dots\dots(5)$$

で与えられる。したがって、液状化現象を支配する要因は、静隠時の有効土被り圧 σ_{v0}' 、海底地盤表面に作用する水圧の、静隠時からの変動量 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。

式(3)、式(5)における σ_{v0}' は、海底表面の上載荷重による地盤中の有効応力を σ_s' 、地盤の水中単位体積重量を γ' 、地盤面からの深度を z とすると、次式で与えられる。

$$\sigma_{v0}' = \gamma' z + \sigma_s' \quad \dots\dots(6)$$

海底地盤中の変動間隙水圧 p_m は、次式で示す基礎方程式で表される。

$$C_v \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial p_m}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 C_v : 圧密係数 ($=k/m_v \cdot \gamma_w$)、 α : 伝達係数で、 k : 土の透水係数、 m_v : 土の体積圧縮係数、 γ_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 : 海底面からの深度である。また、伝達係数は、 p_{mg} を絶対圧力で表した地盤中の間隙水圧、 S_r を飽和度、 m_{w0} を飽和した水の圧縮率とすると次式で表される。

$$\alpha = 1 + n \cdot \frac{m_w}{m_v} = 1 + \left(\frac{n}{m_v} \right) \left(m_{w0} S_r + \frac{1 - S_r}{p_{mg}} \right) \quad \dots\dots(8)$$

初期条件および境界条件は、層厚を l として、

$$\left. \begin{aligned} t=0 \text{ で } p_m &= 0 \\ z=0 \text{ で } p_m &= p_b \\ z=l \text{ で } \partial p_m / \partial z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(9)$$

で与えられる。

式(7)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後述するが、理論的取扱を簡単にするために、ここでは、とりあえず微小振幅波を仮定すると、 p_b は式(10)で与えられる。

$$p_b = p_0 \cdot \sin(\lambda x - \omega t) \quad \dots\dots(10)$$

ここに、 p_0 : 海底面上の水圧変動振幅 ($=\gamma_w \cdot H/2 \cosh(\lambda h)$)、 H : 波高、 h : 水深、 ω : 角振動数 ($=2\pi/T$)、 λ : 波数 ($=2\pi/L$)、 T : 周期、 L : 波長、 x : 水平方向座標である。次元の場合、式(10)の λx の項は考慮しなくてもよい。

この場合、式(7)は、 $C = C_v \cdot T/t^2$ 、 $\bar{Z} = z/l$ 、 $\bar{T} = t/T$ 、 $\bar{P} = p_m/p_0$ とおくことにより、以下のように無次元化される。

$$C \cdot \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{Z}^2} = \alpha \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{T}} + 2\pi \cos(2\pi \bar{T}) \quad \dots\dots(11)$$

初期条件および境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}=0 \text{ で } \bar{P} &= 0, \\ \bar{Z}=0 \text{ で } \bar{P} &= \sin(2\pi \bar{T}) \\ \bar{Z}=l \text{ で } \partial \bar{P} / \partial \bar{Z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(12)$$

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(11)において、 \bar{P} は、前述の伝達係数 α と排水係数 C に支配される。したがって、係数 α 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変動間隙水圧が求められる。

実際の現地観測においては、式(6)で表される静隠時の有効土被り圧 σ_{v0}' と変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ を観測し、式(5)を用いて液状化の判定を行っている。また、式(7)を用いて変動間隙水圧を解析し、現地観測結果との比較を行っている。

3. 波崎砂の液状化特性

3.1 実験概要

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。実験方法の詳細については既に報告されている⁴⁾ので、ここでは、その概要についてのべる。

実験に使用した装置は、変動水圧型液状化試験装置である。この装置に、試料長 188cm、乾燥密度 1.41g/cm³ 前後となるように波崎砂を詰めた。波崎砂の物理的性質および粒径加積曲線は、それぞれ表-1、図-1 に示されている。水深 4m~5m 地点の地盤を想定し、静水圧として、0.5kgf/cm² を加え、その状態で、表-2 に示す周期 T と両振幅 $2\bar{p}_0$ 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

表-1 波崎砂の物理的性質

比重	G_s	2.689
最大乾燥密度	$\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	1.600
最小乾燥密度	$\rho_{d \min}$ (g/cm ³)	1.233
最大間隙比	e_{\max}	0.681
最小間隙比	e_{\min}	1.181
均等係数	U_c	1.5~1.6
50%粒径	D_{50} (mm)	0.16~0.17

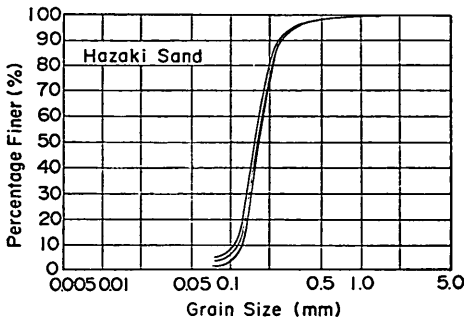


図-1 粒径加積曲線

表-2 水圧载荷条件

ステージ No.	周期 T (s)	振幅 \bar{p}_0 (kgf/cm ²)	$2\bar{p}_0$ (kgf/cm ²)	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	0.160	-0.157	0.317
6	5	0.115	-0.112	0.227
7	3	0.070	-0.062	0.132

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、ステージ数は7である。測定項目は、10cm もしくは 20cm 間隔で設置した各深度ごとの間隙水圧、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、本実験とは別に、排水係数 C 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が、これらの結果については 7.2 で述べる。

3.2 実験結果

(1) 変動間隙水圧

地盤表面に作用する水圧変動に対して、地盤中の変動間隙水圧がある位相と減衰をもって伝達されることは既に明らかにされている。波崎砂に関しても同様なことが言えるかどうか確認したものが、図-2~図-4 である。図-2 では、地盤表面 ($z/l=0.0$)、地盤中 ($z/l=0.45$) および地盤底面 ($z/l=1.0$: 不透水境界面) における波の数が10波のときの1周期分を示している。また、図-3 では、地盤表面の水圧と変動間隙水圧の比(水圧比)の深度分布を示している。これらの図-2、図-3 から、波崎砂の場合も、既往の結果と同様に、地盤中の間隙水圧が低減することが明らかである。図-4 は、地盤表面に作用する水圧のピーク時(波の峰に対応)に対する変動間隙水圧のピーク値の位相差(ただし、横軸の目盛は $\theta \times 2.2$ で表示)を描いたものであるが、深度が大きく

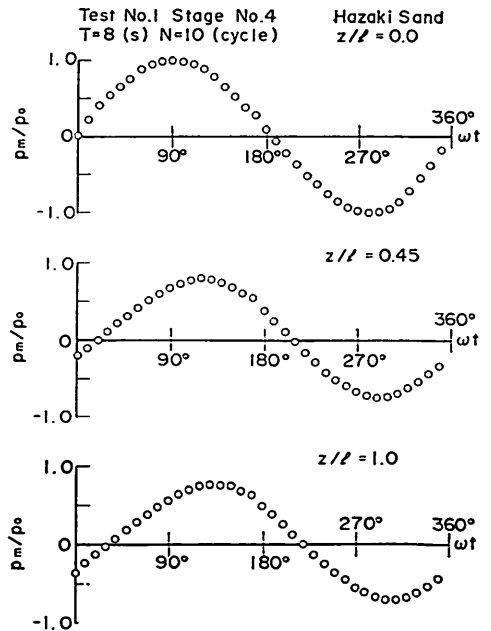


図-2 変動間隙水圧

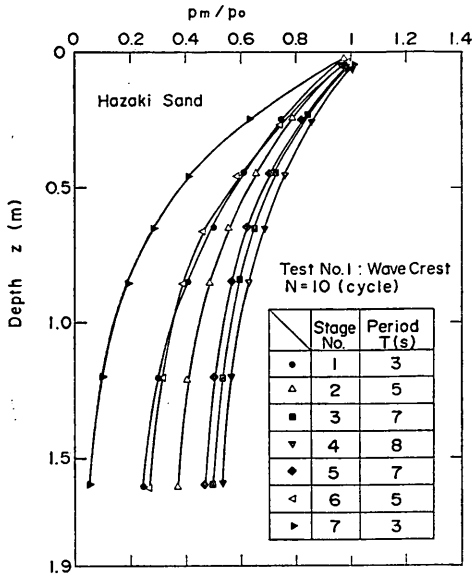


図-3 水圧比の深度分布

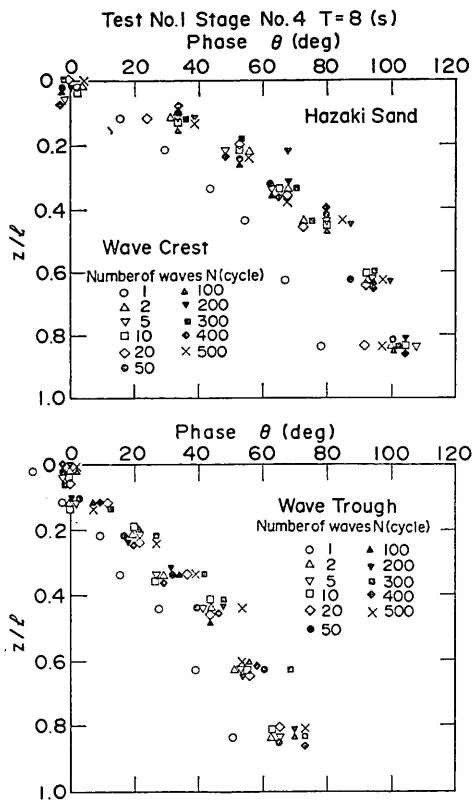


図-4 波の数と位相差

なるにつれて位相差も増加することが分る。また、波の数が約10波以上になると、位相差はほぼ一定となり、変動間隙水圧の挙動が定常状態にいたっている。ここでは、一例しか示していないが、これらの傾向は、すべてのステージにおいて観測されている。したがって、以下の実験結果の整理では、基本的に波の数10波のデータを用いることにする。

(2) 変動過剰間隙水圧

地盤内の変動過剰間隙水圧が測定されれば、2.で述べたように、変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ が求められる。図-5は、ステージ No. 1 と No. 4 における変動過剰間隙水圧の深度分布を描いたものであるが、図-5(a)と図-5(b)を比較すると、両者は一部やや異なった分布形をしている。すなわち、図-5(a)では、分布形はほぼ双曲線形をしているのに対して、図-5(b)の位相 330° と 0° (360°) の

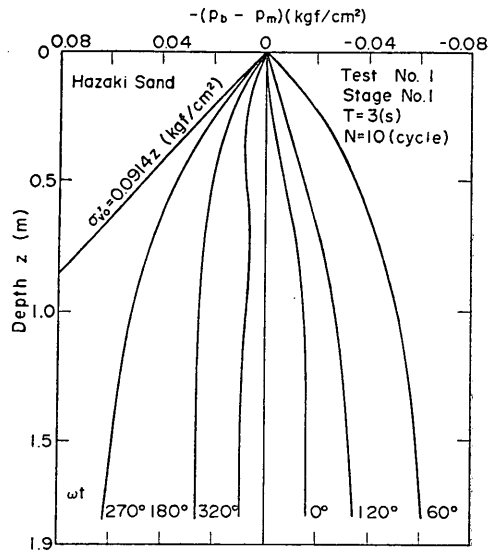


図-5(a) 変動過剰間隙水圧分布 (非液状化)

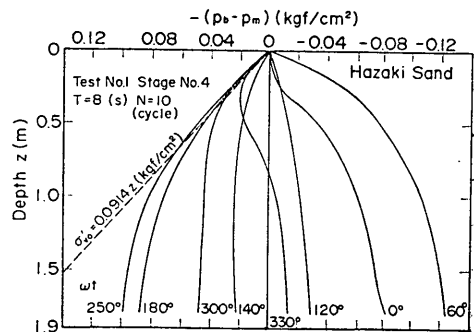


図-5(b) 変動過剰間隙水圧分布 (液状化)

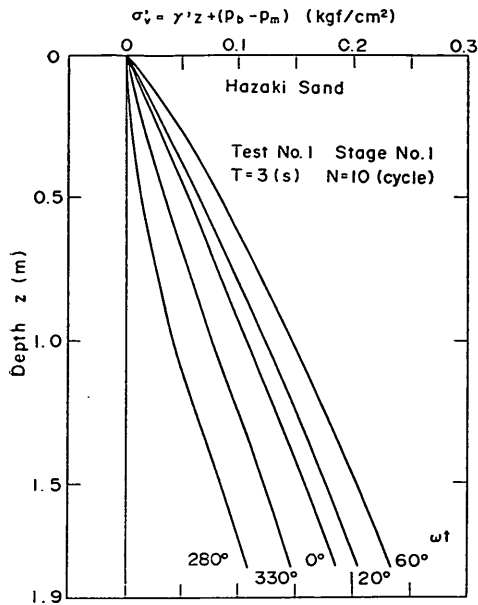


図-6(a) 有効鉛直応力分布 (非液状化)

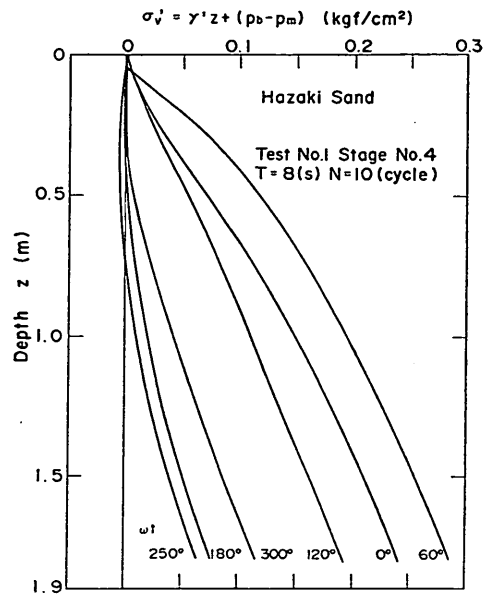


図-6(b) 有効鉛直応力分布 (液状化)

ときの形状は、双曲線形とは明らかに異なっている。これは、 $-(p_b - p_m)$ が図-5(b)中に破線で示した静水圧状態における有効鉛直応力 σ_{v0}' (水中単位体積重量: 0.914 gf/cm^3 から求まる $\sigma_{v0}' = 0.0914 z (\text{kgf/cm}^2)$ 、ここに z の単位は(m) に等しくなった (液状化が発生した) 後に現れており、液状化が発生すると土粒子のかみ合いがこわれ懸濁状になることから、 $-(p_b - p_m)$ の分布に影響が現れたためと考えられる。

(3) 液状化現象の発生

図-6 は、式(3)を用いて、それぞれ、ステージ No. 1 と No. 4 における有効鉛直応力 σ_v' の深度分布を求めた結果を描いたものである。図-6(a) の場合には、 σ_v' は、ほぼ正の値となっているが、図-6(b) の場合には、位相 $\omega t = 180^\circ \sim 300^\circ$ (波の谷) 付近で $\sigma_v' = 0$ となっており、明らかに液状化が発生していることが確認される。たとえば、位相 $\omega t = 250^\circ$ の場合には、液状化深さは 0.7m 程度となっており、波崎砂の場合も、条件がそろえば波浪による液状化の可能性があると考えられる。

(4) 変動水圧応荷後の地盤状態

室内実験において、水平方向の流れのない一次元的な水圧変動を加えると地盤は高密度化する(締固められる)ことが知られている。今回の実験でも、水圧応荷による地盤中の鉛直ひずみおよび相対密度の変化が測定されており、それらの結果をそれぞれ図-7、図-8 に示す。図-7、図-8 によると、図-6 に示した液状化深度と地盤中

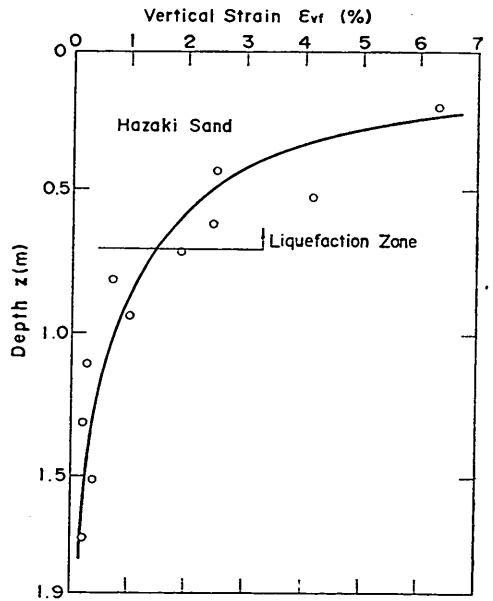


図-7 鉛直ひずみ分布

の大ひずみ発生領域ならびに高密度化領域とは良い相関がみられること、地盤の表層部ほど密度が大きいことなど、波崎砂の場合も既往の実験⁴⁾結果と同様な傾向がみられる。

図-9 は、ステージテスト終了後、試料を各セルごとに切り出し飽和度を測定した結果である。図-9 に示し

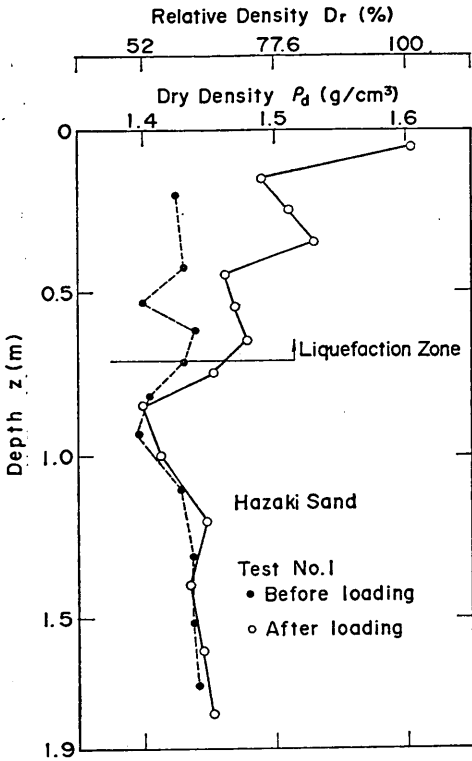


図-8 相対密度分布

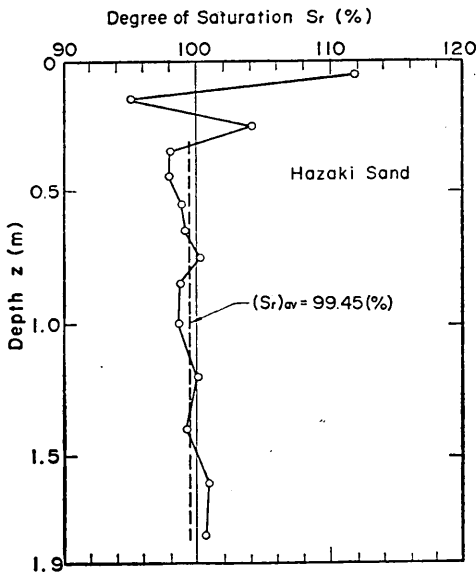


図-9 飽和度分布

た飽和度の測定結果には、地盤表層部の飽和度測定技術上の誤差（地盤表面の位置がセルの途中にあることから、セルごと試料を切出せないことによる）が含まれているが、これらのデータを除いた平均の飽和度は 99.45%と決まっている。この結果は、7.2 で述べる伝達係数を決定するさいに用いられている。

4. 現地観測概要

4.1 観測場所

現地観測は、図-10 に示す茨城県鹿島郡須田浜地先に建設された港湾技術研究所「波崎海洋研究施設 (HORF)」¹²⁾ において実施された。本施設は、図-11 に示すように、海岸線から 427m 沖合に延びた棧橋構造の施設で、高さは干潮面から 7 m、幅は 3.3m である。観測地点は、この棧橋の先端付近の水深約 4 m 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 2 m 以浅の浅い部分を対象としている。

4.2 地盤特性

観測地点の地盤は、図-12 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})、礫混じり洪積砂層 (D_{S2}) からなる。細砂層 (A_{S1}) は、黄灰色の緩く推積した砂層で、N 値は 6～8 程度である。沖積中砂～細砂層 (A_{S2}) は、層厚 4 m～8 m 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。この波崎砂層は、図-1 の粒径加積曲線に示したように、一般の海浜の砂と同様、粒径の比較的均一な粒子からなる。原位置の海底表層部に、内径 76mm、高さ 200mm のステンレス製円筒容器

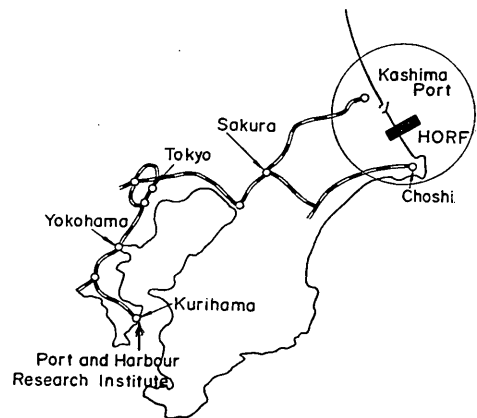


図-10 観測場所

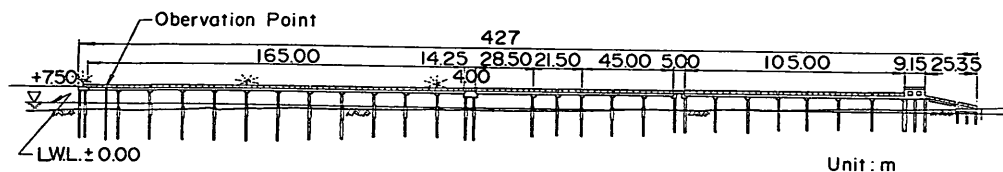


図-11 波崎海洋研究施設

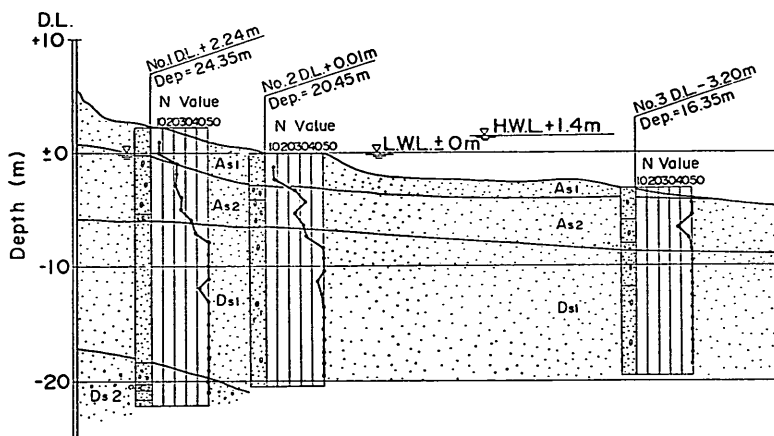


図-12 土層断面図

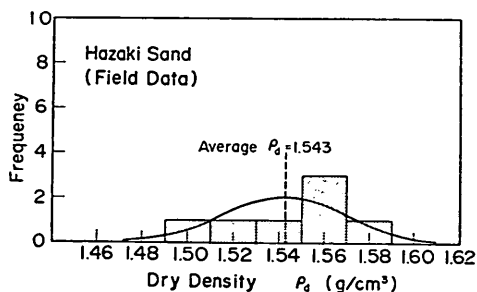


図-13 地盤の密度

を押込み、採取した砂の密度を測定したところ、図-13の結果が得られた。結果にはかなりばらつきがあるが、平均値を求めると乾燥密度で 1.543 g/cm^3 、水中単位体積重量換算で 0.969 gf/cm^3 であった。

4.3 観測方法

(1) 項目および計器

観測項目は、波高、流速、潮位、海底砂面の移動、海底地盤表面の水圧変動、地盤中の間隙水圧変動および土圧である。これらの測定を行うにあたっては、表-3の各機器を用いている。間隙水圧計は、データインストルメ

表-3 計測機器

測定項目	機 器	型 式	容 量
間隙水圧	間隙水圧計 (デ・イ社)	半導体ストレン ゲージ A B-50型	3.5 kgf/cm ²
土 圧	土圧計 (共和電業)	二重ダイアフラム BE-2 K M 型	2.0 kgf/cm ²
傾 き	傾斜計 (アレック電子)	電解液抵抗変化 ACO 型	±70°
砂面変動	砂面計 (三洋測器)	赤外線発光遮断 タイプ	深さ 3 m 5cm ピッチ
流 速	電磁流速計 (アレック電子)	二軸電磁流速計 ACM-200	±600 cm/s

ンツ社製の半導体スレンゲージタイプ AB-50 型 (容量: 3.5 kgf/cm^2) を用いた。設置時の施工性を考慮して、この間隙水圧計を、図-14に示すように、直径約 55 mm のステンレス製パイプ内に 50cm ピッチで 5 個組込んだものを用いた (以後、これを間隙水圧計測機器とよぶ)。水圧の受圧部周面には、フィルター材として、円

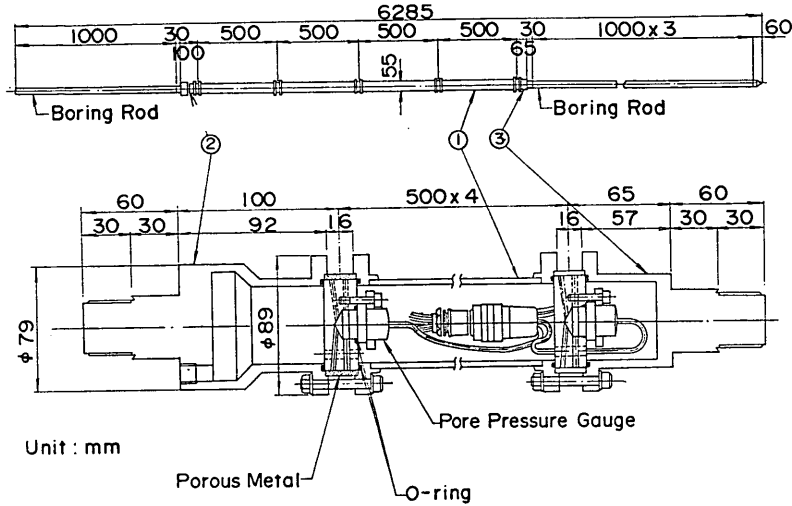


図-14 間隙水圧計測機器

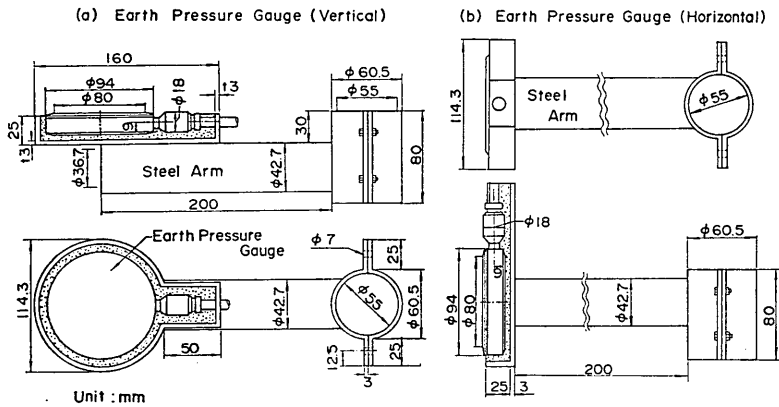


図-15 土圧計の取り付け状況

筒形のポーラスメタル（外径 65mm，内径 59mm，高さ 20mm，材質 SUS 40 μ ）を取り付けた。また，設置時に受圧部の空気抜きを完全にし，受圧部が海水で満たされるように 2 系統の空気・水抜き孔を設けている。土圧計は，波圧計としても適用可能な機構を有する共和電業社製の土圧計 BE-2 KM 型（容量：2 kgf/cm²，受圧面の直径：80mm）を 4 個用いている。これらを図-15 に示すように，それぞれ，水平，鉛直方向に向けて鋼製アームに固定し，間隙水圧計測機器の No. 3 と No. 5 に対応する位置に取り付けた。これらは，間隙水圧計測機器から 20cm だけ離れている。また，土圧計の傾きを測定するために，測定誤差が $\pm 1^\circ$ 以内の傾斜計を設置した。砂面の変化は，三洋測器社製の砂面計を用いて測定

している。これは，ステンレス角棒（30mm \times 32mm，長さ 4 m）に組込まれた一対の赤外線発光器と受光器の光軸が，砂で遮断されることによって回路がオフとなり，砂面が感知されるものである。センサーの個数は 61，ピッチ 5 cm，測定範囲 3 m である。流速計は，海底面から 1 m 上側に設置した。波高計は，棧橋上に設置されている超音波式の波高計（ST No. 1）により観測されたデータを用いた。

図-16 に観測用計器の埋設位置を示している。各機器は，鋼管支柱から水平に 1 m の水平固定パイプを伸ばし，そこから鉛直に埋設・設置されている。なお，本観測では，海底地盤表面における間隙水圧を測定することが望ましいことから，時化などで海底面が大きく変化した場

合には、一度機器を引上げ再設置している。

(2) 機器の設置方法

鋼管支柱（外径 216.3mm, 肉厚 12.7mm, 長さ 5.5 m/本）は、ウォータジェットにより海底地盤中約 5m まで埋込まれている。鋼管支柱の上部には H 鋼を取り付け、栈橋の PC 桁にアンカーボルトで固定した。図-15 に示したように、その支柱から 1m の距離まで水平固定パイプを張り出し、ウォータジェットにより埋設した間隙水圧計測機器等を固定した。センサーからのケーブルは、水平固定パイプおよび鋼管支柱にそわせ、ステンレスバンドで固定しながら栈橋上へ立上げた。栈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、鋼管支柱の上端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、機器設置による地盤の乱れが落ち着く

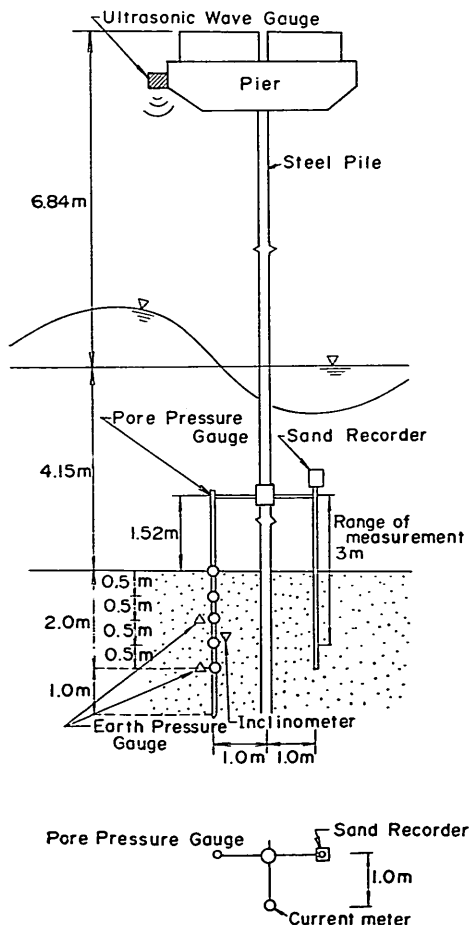


図-16 計器埋設状況

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。間隙水圧計、土圧計、傾斜計、砂面計および流速計のデータは、観測栈橋に設置されている送信ケーブルを通して観測室に送られる。これらの記録は、共和電業社製のデータレコーダ (RTP 800) にアナログデータとして取込まれた。砂面計の記録だけは、パーソナルコンピュータに直接取込まれている。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デジタル変換・処理し解析した。

5. 現地観測結果

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）に、波高計 (ST No. 1) において観測された波浪の特性について、有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の関係、有義波高および有義波周期の出現頻度を描いたものが図-17 である。ここでは、ゼロダウンクロス法によりデータの整理を行っている。図-17 によると、上記観測期間における周期は、波高が大きくなっても 7 s ~ 10 s 程度の値と頭打ちの状況になっているおり、これは、波が観測地点あたりで砕波することによるものと思われる。また、データ取得時の有義波高の最大値は、250cm 程度で、有義波周期の最頻値は 9 s 前後となっている。

5.2 変動間隙水圧

観測で得られた記録の一部については既に報告されている^{13), 14)}。ここでは、得られたデータのうちの代表的ないくつかについて詳細な検討を行う。解析の対象とした記録は、①昭和63年5月9日18:00からの記録（観測シリーズ1）、②昭和63年5月11日20:00からの記録（観測シリーズ2）、③平成元年4月24日2:00からの記録（観測シリーズ3）である。

現地観測で得られた海底面水圧変動 p_b および変動間隙水圧 p_m と海面変化 η を図-18 に示しているが、これは、昭和63年5月9日18:00から7分間（420秒間）の記録（観測シリーズ1）を一例として示したものである。図-18 の観測記録から、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-19 (a) である。観測シリーズ2、観測シリーズ3の拡大記録についても図-19 (b), (c) に示している。図-19 で、間隙水圧計測機器は固定されているので、海底面の変化によって5個の間隙水圧センサーの地盤表面からの深度は、設置時点とは異なっている。この海底面の変化は、

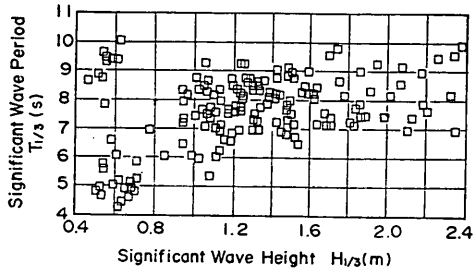


図-17(a) 有義波高と有義波周期の関係

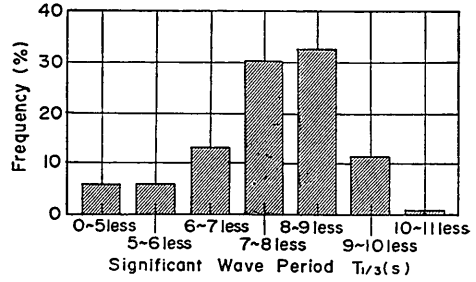


図-17(c) 有義波周期の出現頻度

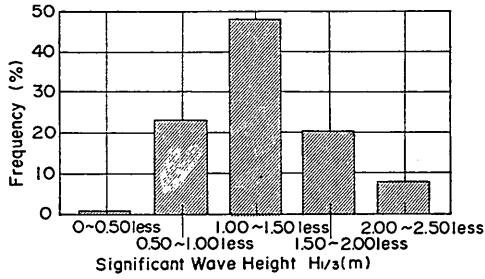


図-17(b) 有義波高の出現頻度

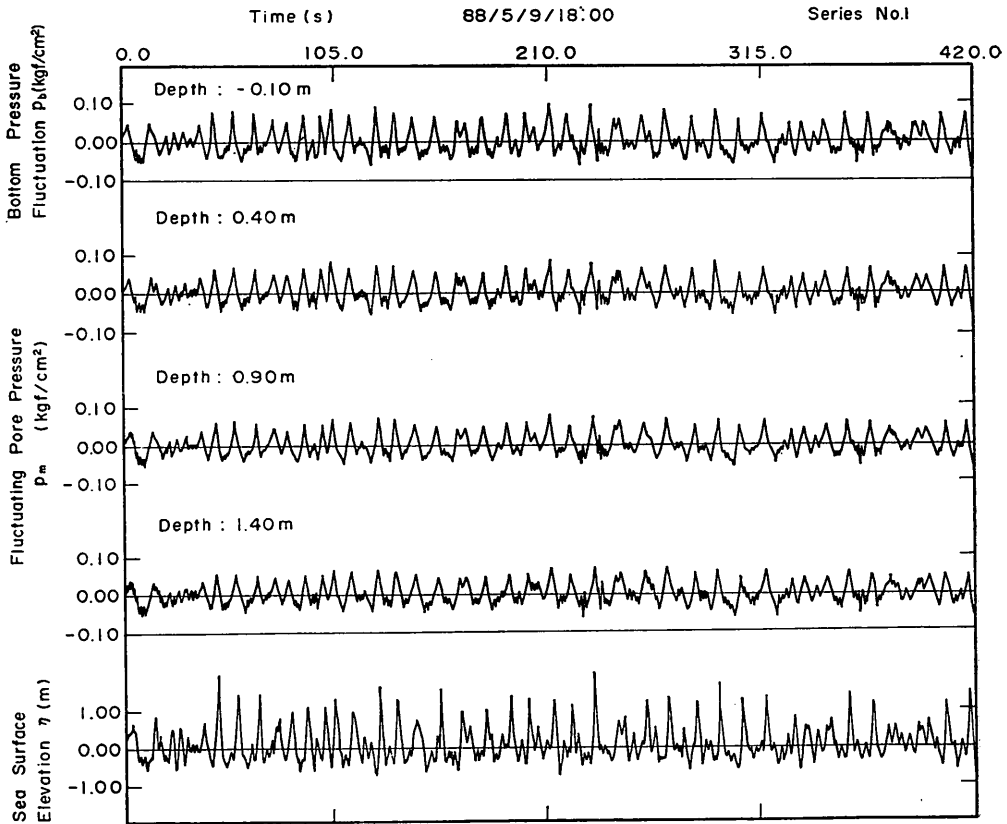


図-18 観測記録例

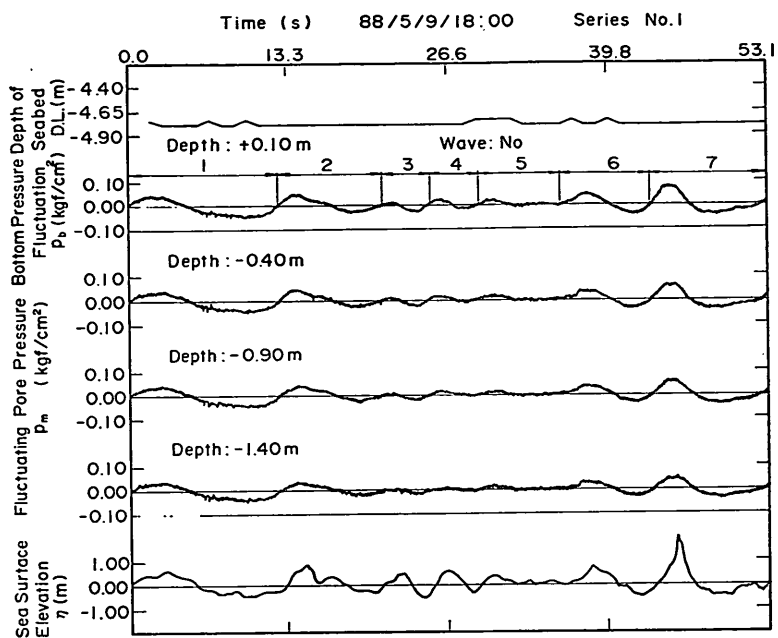


図-19(a) 観測記録の拡大図 (観測シリーズ1)

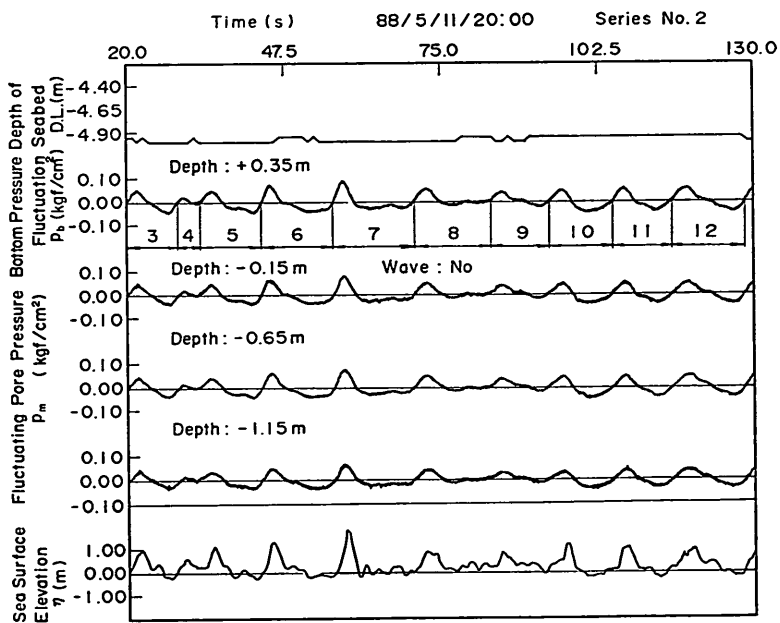


図-19(b) 観測記録の拡大図 (観測シリーズ2)

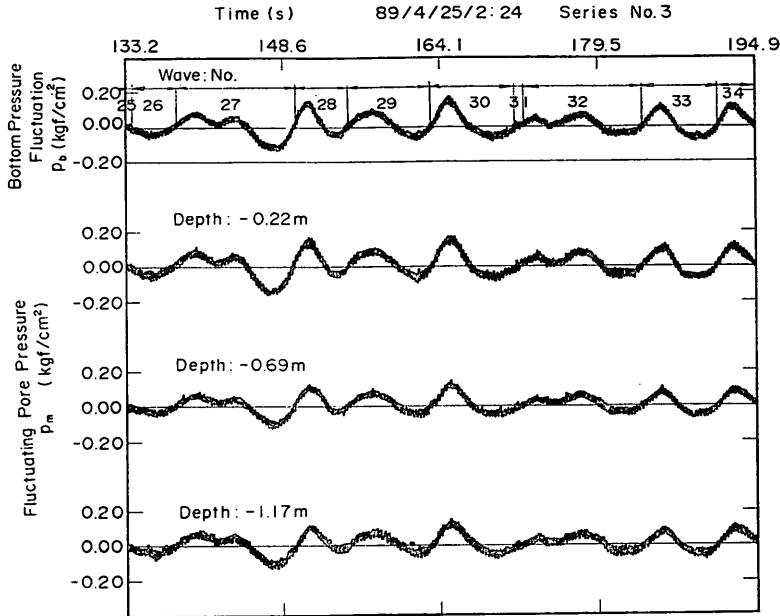


図-19(c) 観測記録の拡大図 (観測シリーズ3)

砂面計により観測されるが、砂面計の深度方向の測定ピッチが5 cmであることから、観測データは5 cmごとの変化として記録される。図-19(a), (b)には、砂面計で得られた海底面の変化状況もあわせて描かれているが、これらの場合には、あまり大きな砂面の変化は観測されていない。図-19(c)には、砂面計の記録は示されていないが、この記録については後で示すことにする。

これまで、変動間隙水圧 p_m は、海底面の水圧変動 p_b に対して、ある位相と減衰をもって変動することが明らかとなっているが、図-19では、このような傾向が明確には読取れないので、一例として図-19(a)の各波の番号1~7の波形の峰に対応する時刻における水圧比 p_m/p_b を求めたものが図-20である。図-20によると、 p_m は明らかに p_b よりも小さくなっていることが分る。また、図-20には、波崎砂を用いた室内実験結果(平均値)もあわせて描かれている。室内実験と現地における密度は必ずしも同じではないが、現地観測結果と室内実験結果は傾向的にはほぼ対応していることがわかる。このことは、密度の相違が p_m/p_b に対してはそれほど大きな影響を与えないことによる⁴⁾ものと考えられる。

図-21は、現地観測で得られた海底地盤表面の水圧と変動間隙水圧から、水圧比 p_m/p_b を求め、周期 T に対してプロットしたものである。図-21には、筆者らを取りまとめた他の研究者による室内実験および現地観測結果⁴⁾もあわせて示している。ただし、室内実験結果は、

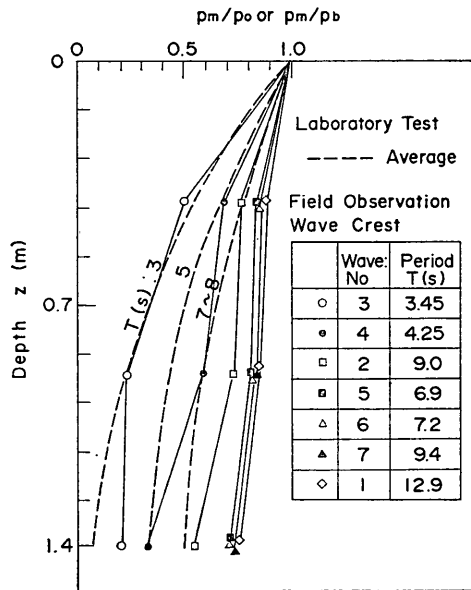


図-20 水圧比の深度分布 (室内実験および現地観測結果の比較)

無次元深度 z/l がほぼ0.45の位置における値であるが、現地観測結果では、不透水境界面が明確ではないので、深度40cmと140cmのデータをそのままプロットしている。図-21をみると、海底地盤中の変動間隙水圧は波の周期に依存しており、周期が小さくなるにつれて水圧比

も小さくなっている。式(4)が成立するという前提に立つと、 $\Delta\sigma'_v = p_b(1 - p_m/p_b)$ となるから、 $p_m/p_b < 1$ の場合には、波浪の作用によって海底地盤中の有効鉛直応力も変動し、周期が短いほどこの $\Delta\sigma'_v$ が大きいことを意味している。一方、 $p_m/p_b = 1$ の場合には、 $\Delta\sigma'_v = 0$ となり、地盤中の有効鉛直応力の変動はないことになる。後者の場合は、静水面が変化（全応力が変化）しても地盤中の有効応力は一定に保たれるという一般に用いられている「有効応力の原理」の説明概念と一致する。以上のことから、周期15秒程度以下の波によって引きこされる海底

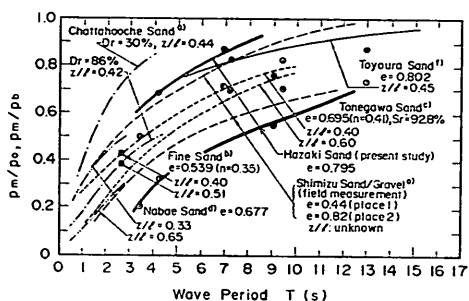


図-21 周期と水圧比 (文献: a) Tsui 他¹⁵⁾ (1983), b) Yamamoto⁹⁾ (1977), c) 井上⁸⁾ (1975), d) Maeno 他¹⁶⁾ (1984), e) Okusa 他¹⁷⁾ (1984), f) 善他⁴⁾ (1987))

地盤表面の水圧変動は、地盤中の有効鉛直応力の変動を発生させる外力として作用することが明らかであろう。ただし、図-21に示した水圧比は、地盤の土質特性、層厚、対象とする深度などにも依存するから、いちがいに周期15秒程度以上の波に対して $p_b \approx p_m$ となるとは言えないことに留意すべきである。

5.3 地中応力の変動

観測シリーズ3では、4.で述べたように、海底地盤中に鉛直・水平方向に向けた2個ずつ計4個の土圧計を埋設している。これらの土圧計から得られた観測記録を示したものが図-22である。ただし、図-22では、土圧の絶対量ではなく波浪による変動量を示している。また、この中には、図-19に示した変動間隙水圧成分も含まれており、いわば全応力変動を意味していると考えられる。図-22において注目すべき点は、 $\Delta\sigma_{h1}$ が他の記録とは異なりノイズのようなきわめて周波数の高い波形がみられることである。また、これは、他の応力 $\Delta\sigma_{v1}$ 、 $\Delta\sigma_{v2}$ 、 $\Delta\sigma_{h2}$ が減少しているとき(3.で述べた室内実験の結果から推測して、液状化が発生している可能性の高い位相、すなわち、波形の谷のところ)で顕著に現れるという特徴を有している。この理由については明確ではないが、仮に、土圧計埋設深度-0.32m以深まで液状化が発生している(このことは、6.2で示す)とすると、懸濁状態になった土粒子が土圧計の受圧面に流体的に作用

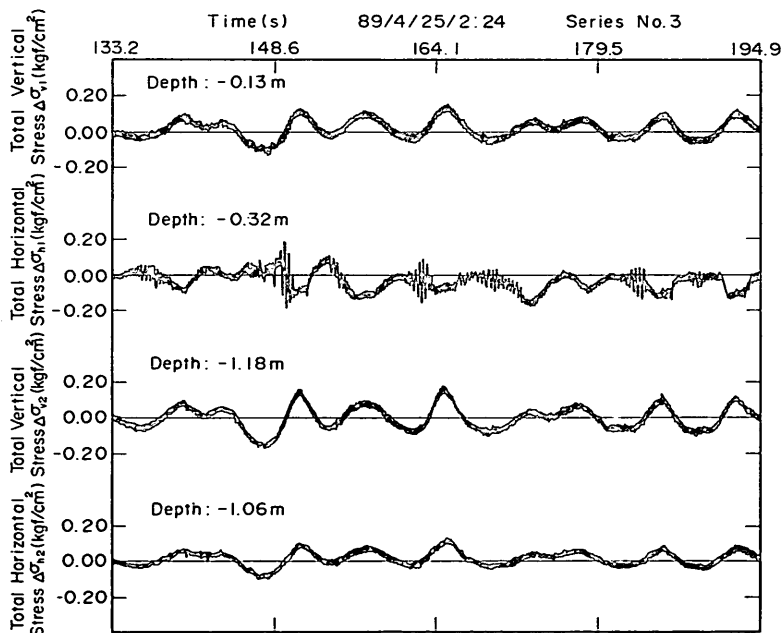


図-22 土圧の観測記録例

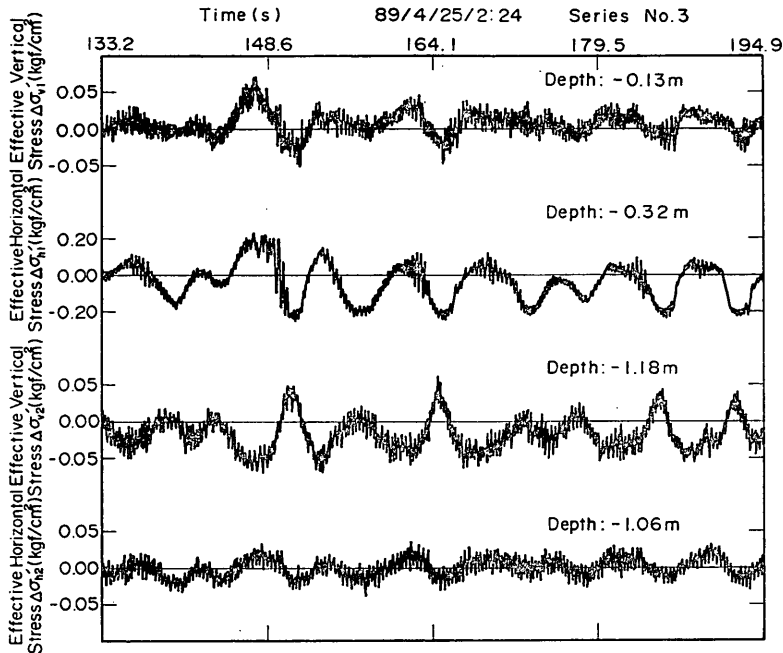


図-23 有効応力の時系列変化

することによって、このような観測記録が得られたものと考えられる。ただし、 $\Delta\sigma_{h1}$ よりも浅い位置にある $\Delta\sigma_{v1}$ については、このような現象は観測されていない。上述のことはあくまでも仮説の域をでておらず、今後、室内実験などにより詳細な確認実験を行う必要があるものと思われる。なお、観測終了後チェックしたところ、土圧計には何ら異常はみられなかった。

図-22 は全応力を描いたものであるが、同時に観測された各土圧計近傍の変動間隙水圧成分を観測値から差し引いたものを描くと、図-23 のような有効応力変動の時系列が得られる。得られた結果にはかなりのノイズが含まれているが、海底地盤中の有効応力は、海底地盤面の水圧変動にともなって変動していることが確認される。さらに、水平応力 $\Delta\sigma_{h1}'$ を除いたその他の有効応力変動 $\Delta\sigma_{v1}'$ 、 $\Delta\sigma_{v2}'$ 、 $\Delta\sigma_{h2}'$ については、変動の傾向が良く一致している。すなわち、一例として時間148.6sから164.1s間の波形をみても明らかに、位相や変動量の相違はあるものの変動形状はほぼ同様となっている。 $\Delta\sigma_{h1}'$ については、他のデータと異なった傾向を示しており、変動量が他の記録に比較して4倍程大きくなっている。この理由については既に述べたように必ずしも明確ではなく、今後の検討を要すると考えられる。いずれにしても、地中応力変動の観測結果から、波浪の作用によって海底地盤中の有効応力も逐一変動することが確認

されたわけであるが、このような海底地盤中の有効応力の変動が実際の海域において観測された例は、筆者らの知る範囲内では見当らず、その意味では、図-23 に示された例は、貴重なデータであると考えられる。

6. 海底地盤の液状化に関する考察

6.1 変動過剰間隙水圧と有効応力

5.3 で述べたように、海底地盤中の有効応力は、波浪の変動にともなって変動している。図-24 は、図-23 に示した土圧計から得られた鉛直有効応力 $\Delta\sigma_v'$ と測定した水圧から、式(4)を適用して得られた鉛直有効応力 $(p_b - p_m)$ を比較したものである。比較にあたっては、図-23 に現れているような高周波数成分は取除いた。 $\Delta\sigma_v'$ と $(p_b - p_m)$ はやや異なるところもあるが、現地観測における土圧の測定精度を考慮すると、全体的にはほぼ一致しているとみなされる。図-25 は、図-24 の中からある波を選び、1サイクル間の代表的な位相(図-25 の1~5の点)における有効応力の変動を比較した結果である。実測された $\Delta\sigma_v'$ (白点)と $\Delta\sigma_v' = (p_b - p_m)$ で求められた有効応力変動量(実線)は、上部の浅いところではあまり良い一致がみられない。この理由は、図-5、図-6 の室内液状化実験結果にも現れているように、地盤中で液状化が発生した場合、土粒子のかみ合いがはずれ懸濁状態となることから、変動過剰間隙水圧の分布が

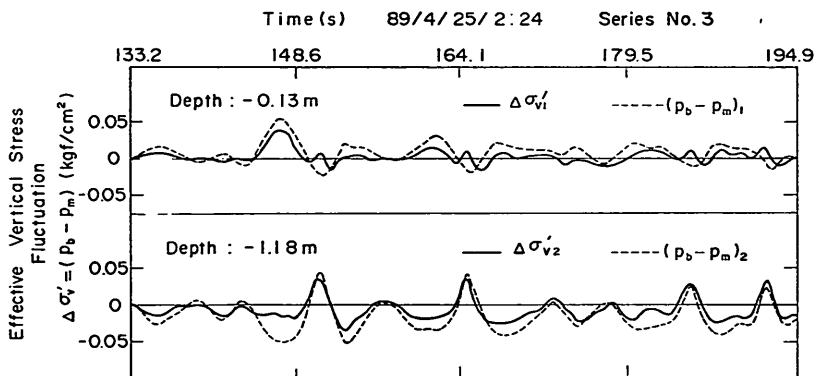


図-24 過剰間隙水圧および有効応力の変動

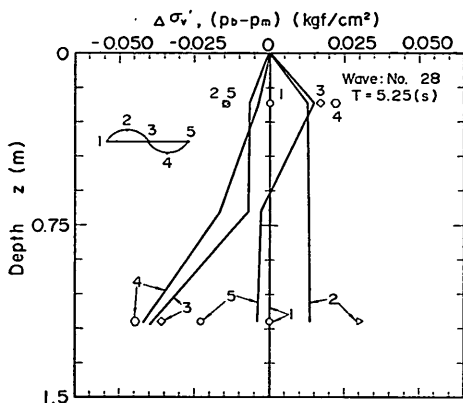


図-25(a) 有効応力の変動分布

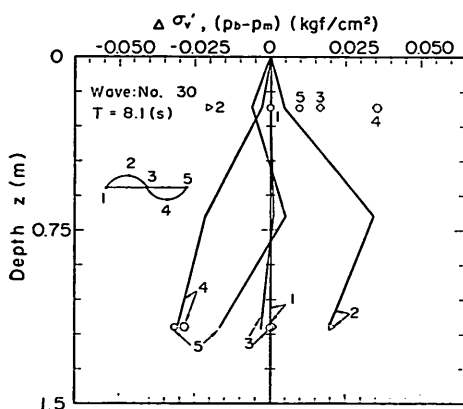


図-25(b) 有効応力の変動分布

かなり特異な挙動をすること、また、このとき有効応力の原理が成立しなくなることによるものと考えられる。一方、液状化が発生していない（このことは、6.2で示す）下部の点では、一部差の大きいところもあるが、ほぼ両者は等しいとみなされる。以上のことは、海底地盤中の有効応力の変動量が、液状化発生後はともかくとして、液状化の発生以前の段階では式(4)で表されることを意味しており、筆者らの主張する変動過剰間隙水圧の概念の妥当性が現地でも確認されたものと考えられる。したがって、液状化が発生する以前の地盤中の有効鉛直応力の変動量を求める場合には、直接応力を測定する必要はなく、波浪によって励起される海底地盤中の変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ を求め、符号を逆にすればよいことになる。

図-26は、このような考えにもとづき、波の1サイクル間における有効鉛直応力の変動を調べるために、変動過剰間隙水圧の深度分布を描いたものである。図-26(a)は、観測シリーズ1の波の番号6に関するもので、位相 10° ごとの変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ の分布を描いているが、変動過剰間隙水圧は、0を中心に正、負の両側に変動している。このような波浪によって励起される変動過剰間隙水圧の挙動は、地震時に発生する過剰間隙水圧には見られないきわめてユニークな特徴であると言えよう。なお、海底地盤表面付近に限定すれば、変動過剰間隙水圧が正の場合、地盤中には上向きの浸透流が生じ、一方、変動過剰間隙水圧が負の場合には、下向きの浸透流が生じると考えられる。この浸透流により生じる浸透力 j は、 $j = \partial \sigma' / \partial \sigma - \gamma'$ で表されるから、式(3)を用いると次式で表される。

$$j = -\frac{\partial p_m}{\partial z} \quad \dots (13)$$

図-26(b)は、図-26(a)から、図-26(b)中に示す代表的な

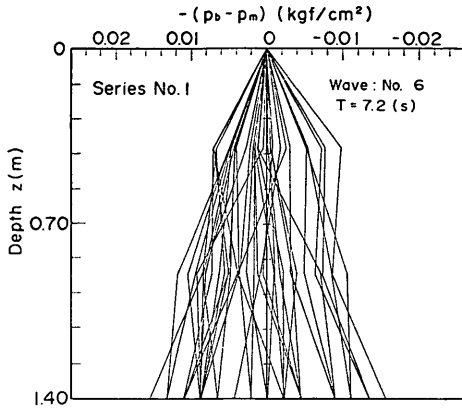


図-26(a) 変動過剰間隙水圧分布

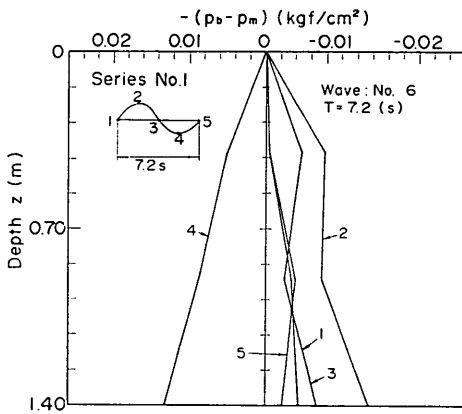


図-26(b) 変動過剰間隙水圧分布

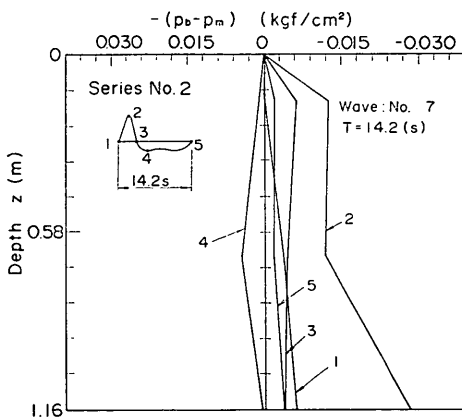


図-26(c) 変動過剰間隙水圧分布

位相 5 点を選びそのときの分布を描いたものである。また、図-26(c)は、観測シリーズ2の波の番号7について、図-26(b)と同様な整理をしたものである。図-26(b)、図-26(c)を比較すると、図-26(c)の方が砕波帯における変動過剰間隙水圧分布の特徴が極端に現れており、砕波後の点4、5には対してそれほど大きな正の変動過剰間隙水圧が観測されていない。このように、砕波帯においては、不規則な水圧の形状に対応した変動過剰間隙水圧が励起されており、このような場所では、従来のような微小振幅波にもとづく理論では不十分で、波の不規則性を十分考慮する必要があると考えられる。不規則波に対する変動過剰間隙水圧の取扱については、7.で詳細に述べることにする。

6.2 液状化の判定

6.1 で示されたような変動過剰間隙水圧の分布が生じると、場合によっては、地盤が液状化する可能性がある。このことは、既に2.2で述べているが、同様な理論的検討は、酒井ら¹⁸⁾によっても行われている。そこで、ここでは、式(5)を用いて海底地盤の液状化の検討を行い実海域における液状化発生の有無を調べた。図-27は、その結果を示したもので、ここでは、1波ごとの有効鉛直応力の最大変動量 $\Delta\sigma_v' = (p_b - p_m)_{\text{MIN}}$ (負の値になる) と静穏時の有効鉛直応力 σ_{v0}' (実測された平均値 $\sigma_{v0}' = 0.0969z$ (kgf/cm²), ここに z の単位は m , を用いるが、図-13に示した密度の差が液化状予測結果に与える影響は無視されるほど小さい) を比較している。図-27(a)は、図-19(a)に示した観測シリーズ1の各波(7波)についての結果であるが、この場合、いずれも $\Delta\sigma_v'$ は σ_{v0}' を越えておらず、液状化が発生しているとは言えない。ただし、ここで重要なことは、たとえ液状化現象は発生していなくても、砂地盤のせん断強さ τ_f は、 $\tau_f = (\sigma - u) \cdot \tan \phi'$ (ここに、 σ : せん断面の垂直応力、 ϕ' : せん断抵抗角、 u : 過剰間隙水圧で、変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ に対応している) で表されるから、地盤のせん断強さも変動過剰間隙水圧の分(有効応力の変動量分)だけ変化していることになる。

図-27(b)は、図-19(b)に示した観測シリーズ2の10波について同様な整理を行った結果である。図-27(a)と同じく $(p_b - p_m)_{\text{MIN}}$ は、地盤中の3点でしか得られなく、これらを直線で結んだ結果を描いているが、少なくとも深度15cm以浅の $(p_b - p_m)_{\text{MIN}}$ 分布は上に凸の形状をすると考えられることから、深度15cm以浅では、ほぼ実線と破線が一致しているとみなしても良いように思われる。このことは、海底地盤の表層部付近において液状化現象が発生している可能性を示唆している。

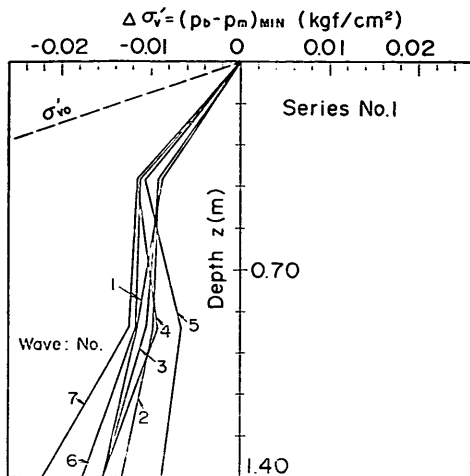


図-27(a) 非液状化 (観測シリーズ1)

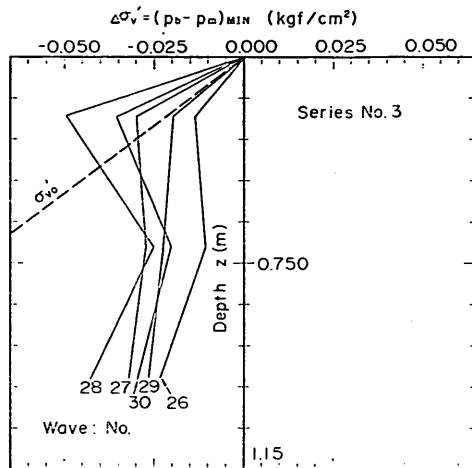


図-27(c) 液状化 (観測シリーズ3)

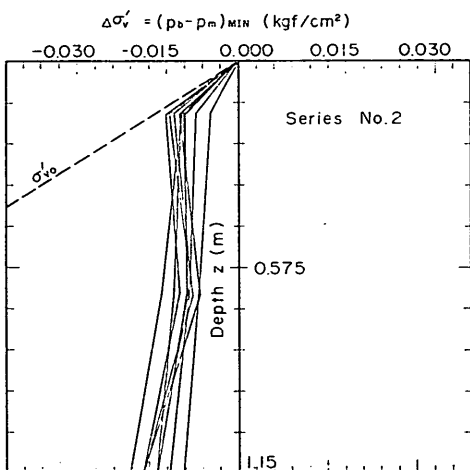


図-27(b) 液状化 (観測シリーズ2)

結果は 5 cm 単位で示されている。図-28 によると、海底面は一度下がってから、しばらく安定した後、また上昇していることが分る。図-27(c)は、図-28 に矢印で示した海底面が下がる時点の結果である。海底面の砂の移動は、海底の流れなどによるばかりではなく、液状化現象が重要な役割を果すと考えられ、砂面移動のポテンシャルを考える上では、液状化現象 (もしくは、砂のせん断強度の低下) を十分考慮する必要がある。液状化と砂面移動の相関については今後さらに詳細な検討が必要であろう。

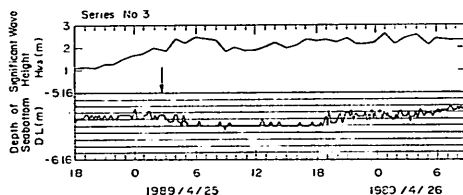


図-28 波高と砂面移動

図-27(c)は、図-19(c)に示した観測シリーズ3の5波について同様な整理を行った結果であるが、この場合、実線で描かれた $(p_b - p_m)_{MIN}$ が破線の σ'_{vo} よりも上側に位置する部分が現れており、明らかに液状化が発生したものと考えられる。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重要な原因の一つと考えられる。

図-28は、観測シリーズ3において砂面計で観測された海底面の移動状況を10分間ごとに描いたもので、測定

7. 提案理論の検証および考察

7.1 理論解析方法

2. 述べたように、液状化の予測を行う場合には、静穏時の地盤中の有効鉛直応力 σ'_{vo} 、海底地盤表面の水圧変動 p_b 、地盤中の変動間隙水圧 p_m を知る必要がある。特に、地盤中の変動間隙水圧は、液状化の予測を行ううえで重要であり、ここでは、この変動間隙水圧の観測値と理論値の比較を行い提案理論の妥当性を検証する。

現地観測で得られた海底面の水圧変動波形は、図-18、図-19 に示したように不規則な波形となっている。解析ではこれらの不規則性を考慮して、式(7)の基礎方程式を直接差分化して用いた。このときの海底表面での境界条件は、現地観測で得られた p_b のアナログデータを20 Hz (0.05 s) 毎にデジタル化し、これらの値を与えているが、より短い時間間隔が必要な場合には、各デジタル値間をさらに細かく分割している。底部不透水境界までの深度は、不透水層が原地盤からは直接決定できなかったため、層厚の影響をいくつか変えて解析し影響の現れない深度とした。このときの層厚は、 $l=230\text{ cm}$ である。解析に用いた差分間隔は、時間間隔 $\Delta t=0.05\text{ s}$ 、位置間隔 $\Delta z=5\text{ cm}$ である。 σ_{v0}' については、現地測定の結果得られた水中単位体積重量から、 $\sigma_{v0}'=0.0969z\text{ kgf/cm}^3$ (ここに、 z の単位は m) としている。

式(7)の適用にあたって必要な入力定数は圧密係数 C_v と伝達係数 α であるが、これらは、7.2 で述べる室内実験により決定した。

7.2 室内実験による入力定数の決定

理論解析を行うにあたっては、前述のように、圧密係数や伝達係数などの入力定数を求める必要がある。図-29は、現地で採取した試料を用いて、これらの定数を決定したフローを描いたものである。圧密係数 C_v は、それぞれ別個に行われる透水試験と一次元圧縮試験から得られる透水係数 k 、体積圧縮係数 m_v を用いて算定される。これらの試験は、3~4種類の乾燥密度に対して行われた。圧密係数が決定できれば、次の2つの方法で伝達係数 α が求まる。①フィッティングによる方法： α をいくつか仮定し、室内液状化実験に対応する条件で理論解析を行い変動間隙水圧の分布を求める。これらと室内液状化実験から得られる変動過剰間隙水圧とをフィッティングすることにより伝達係数 α を求める。②式(8)から算定する方法： n/m_v 、 m_{w0} 、 S_r 、 p_{gm} から、式(8)を用いて α を求める。このようにして得られた値は、現地観測データの理論解析に用いられるが、以下にその具体的な決定法について詳述する。

(1) 透水係数

透水試験は、土質工学会による「土の透水試験方法(案)」(A-1218, T-1978)に準じて行った。供試体の密度は、緩詰めから密詰めまでの4種類とした。図-30は、それらの結果を示したものである。透水係数は、相対密度の増大に比例して小さくなるが、 $k=(1.0\sim 2.4)\times 10^{-4}\text{ m/s}$ である。

(2) 体積圧縮係数

内径 305mm、高さ 350mmの鋼製モールドに試料を

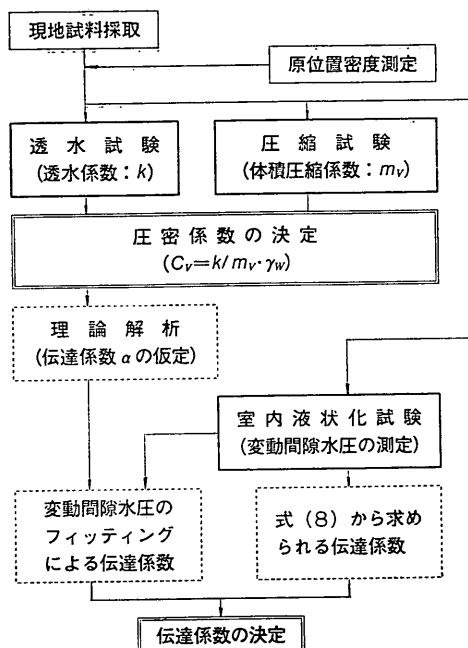


図-29 圧密係数および伝達係数の決定フロー

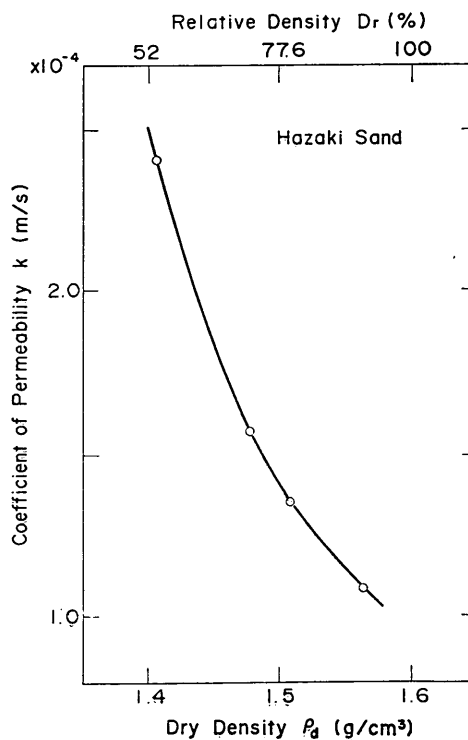


図-30 相対密度と透水係数

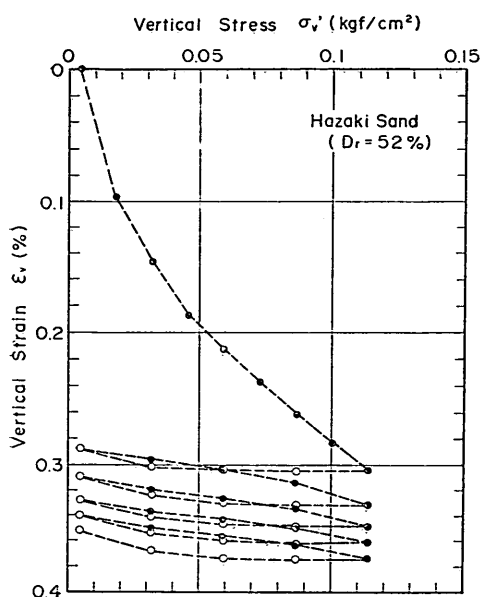


図-31(a) 鉛直応力と体積ひずみ ($D_r = 52\%$)

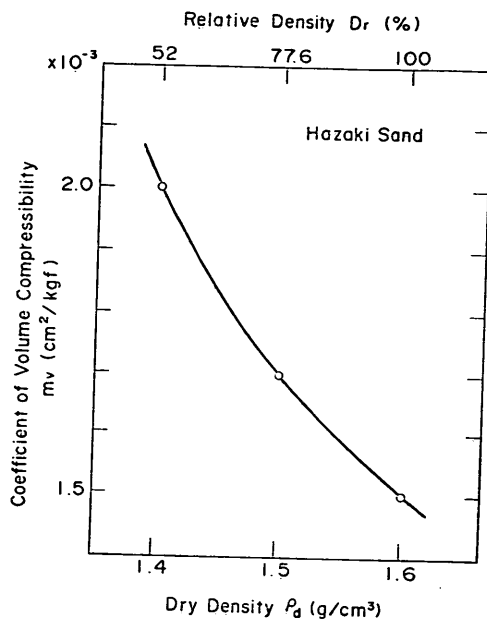


図-32 相対密度と体積圧縮係数

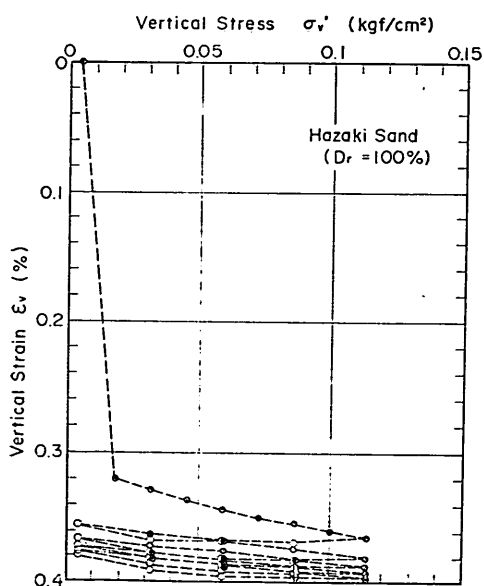


図-31(b) 鉛直応力と体積ひずみ ($D_r = 100\%$)

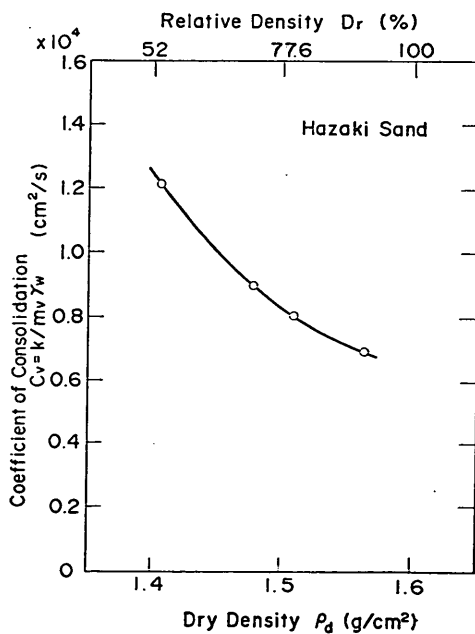


図-33 相対密度と圧密係数

表-4 土質定数一覧

Test No.	乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	水中単位体積重量 $\gamma'(\text{gf/cm}^3)$	間隙比 e	間隙率 n	相対密度 $D_r(\%)$	透水係数 $k(\text{cm/s})$	体積圧縮係数 $m_v(\text{cm}^2/\text{kgf})$	圧密係数 $C_v(\text{cm}^2/\text{s})$	n/m_v (kgf/cm^2)
1	1.407	0.884	0.911	0.477	54	2.407×10^{-2}	1.975×10^{-3}	1.219×10^4	242
2	1.478	0.928	0.817	0.450	72	1.571	1.757	0.894	256
3	1.509	0.948	0.782	0.438	82	1.354	1.682	0.805	261
4	1.563	0.982	0.720	0.419	94	1.087	1.565	0.645	268

詰め、鉛直方向の荷重を段階的に加えて圧縮量を測定した。載荷および除荷を5回繰り返した。図-31は、結果の一例を示したものであるが、1サイクル目の圧縮量は、その後の圧縮量に比較して著しく大きくなっている。2サイクル目からは徐々に圧縮が進むものの、曲線の形状はほぼ同様な傾向を示している。このような関係から、体積圧縮係数 $m_v = \Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma_v'$ (ここに、 $\Delta \varepsilon_v$ は体積ひずみ) で求められるが、圧縮側と膨張側では m_v の値が異なる。ここでは、前回の報告⁴⁾と同じく膨張側の m_v を用いている。図-32は、このようにして求めた m_v と相対密度の関係を描いたものであるが、相対密度が大きくなると m_v は小さくなっており、 $m_v = (1.5 \sim 2.0) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ となっている。

(3) 圧密係数

図-33は、透水係数と体積圧縮係数から圧密係数 C_v を算定した結果を相対密度に対してプロットしたものである。図-33によると、 C_v は、相対密度が大きくなるにつれて減少しているが、今回の試験で行った相対密度の範囲内では、 $C_v = (0.6 \sim 1.2) \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にある。

図-33から、それぞれ、室内液状化実験における密度、

現地における密度に対応する C_v を求めると、室内実験の乾燥密度 1.41 g/cm^3 に対して、 $C_v = 1.152 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、現地の乾燥密度 1.54 g/cm^3 に対して、 $C_v = 0.718 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ が得られた。

以上の土質特性を一覧表にしたものが表-4である。

(4) 伝達係数

室内液状化実験から得られる変動間隙水圧分布と理論解を、図-34に示すようにフィッティングして、各ステージごとに伝達係数 α を求めた。このさい、密度変化は考慮せず、 $C_v = 1.152 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ としている。各ステージごとに得られた α の値を表-5に示すが、得られた値にはかなり幅があり、特に、周期の小さなステージ1、2およびステージ6、7ではかなり大きな値となっている。これは、図-34(b)に示したフィッティング結果をみると明らかなように、変動間隙水圧分布の実測値が、底部において横軸に直角になっておらず(すなわち、測定精度が悪く、実測値が底部境界条件 $\partial p_m / \partial z = 0$ を満足しておらず)、フィッティングの精度が低下したことによるものと考えられる。したがって、これらの値は α の決定に考慮しないことにすると、 $\alpha = 2.0 \sim 2.2$ 、平均 α_{av}

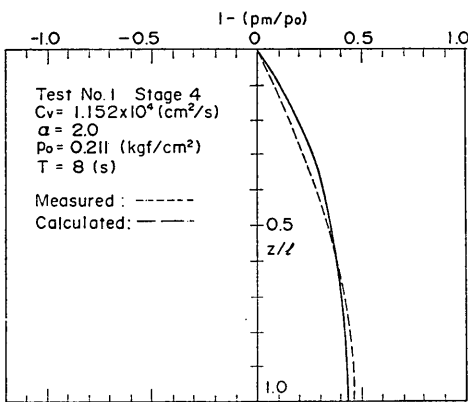


図-34(a) フィッティングによる伝達係数(ステージ No. 4)

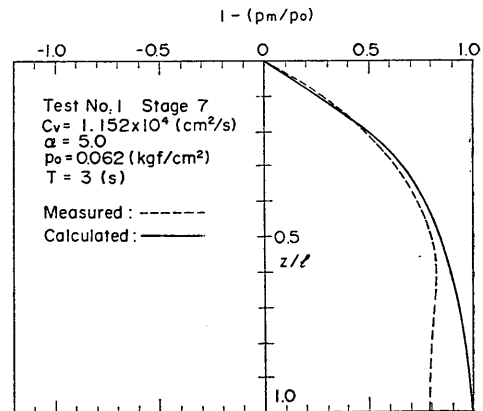


図-34(b) フィッティングによる伝達係数(ステージ No. 6)

は2.1となる。

一方、伝達係数が式(8)により与えられるとすると⁴⁾、 n/m_v 、水の圧縮率 m_{w0} 、飽和度 S_r 、絶対圧力で表した間隙水圧 p_{m0} が分れば α は計算される。 S_r は、図-9に示した室内実験の結果から平均99.45%が得られており、現地の S_r もこれも同じとみなした。 m_{w0} は 4.8×10^{-5} cm^2/kgf 、 p_{m0} は、室内実験では $0.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の静水圧を加えていることを考慮して、変動間隙水圧分を無視すると $p_{m0} = 1.533 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (絶対圧)、また変動間隙水圧分を地盤表面の水圧変動分 p_0 と等しいと仮定すると $p_{m0} = 1.322 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (ステージNo.4の $p_0 = 0.211 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) となり、 n/m_v は、表-5に示した範囲の値をとるから、これらを代入して α を計算すると表-6のようになる。表-6に示された α は1.86~2.12の範囲となっているが、平均して小数第1位までをとると $\alpha = 2.0$ となる。これは、フィッティングによる値とほぼ等しい。

上記の2つの方法で求めた α から、解析に用いる伝達係数として $\alpha = 2.0$ を採用することにする。理論解析に用いる α を決定する方法については、さらに検討の余地

表-5 フィッティングによる伝達係数

ステージ No.	水圧変動振幅 \bar{p}_0 (kgf/cm ²)	周期 T (s)	伝達係数 α
1	0.068	3	3.5~4
2	0.116	5	2.6
3	0.159	7	2.1
4	0.211	8	2.0
5	0.159	7	2.2
6	0.114	5	3.1~3.2
7	0.062	3	5~6

表-6 式(8)による伝達係数

相対密度 D_r (%)	間隙率/体積圧縮係数 n/m_v (kgf/cm ²)	飽和度 S_r (%)	伝達係数 α	
			①	②
54	242	99.45	1.86	2.00
72	256		1.91	2.06
82	261		1.93	2.09
94	268		1.96	2.12

注) 間隙水圧 (絶対圧力)

① $p_{m0} = 1.533$ (kgf/cm²) ② $p_{m0} = 1.322$ (kgf/cm²)

平均 $\alpha = 2.00$

があると思われるが、 α の値が解析結果に及ぼす感度については、7.3で検討する。なお、豊浦標準砂に対する既往の結果では、 α の平均値は1.90~1.92となっている。

7.3 観測値と理論値の比較

図-35は、観測シリーズ2における観測結果と理論解析結果を比較したもので、海底地盤表面の水圧変動 p_b 、地盤中の深度15cm、65cm、115cmにおける変動間隙水圧 p_m およびそれらの深度における応力比 σ_v'/σ_{v0}' の時系列を示している。理論解析に用いた入力は、7.2で述べた結果から、圧密係数 $C_v = 0.718 \times 10^4$ cm^2/s 、伝達係数 $\alpha = 2.0$ とした。また、境界条件としては、海底地盤表面 (深度 $z=0$) の水圧変動 p_b の観測値を用い、不透水境界として、砂層厚を $l=230$ cm としている。図-35をみると、白丸で表された観測値と実線で表された理論値は、経時変化の状況がきわめて良く一致しており、提案式(7)は、不規則な地盤表面の水圧変動に対しても、地盤中の変動間隙水圧をうまく追跡可能なことが明らかであろう。また、式(7)は、一次元理論であるが、上記の比較結果から判断すると、海底地盤表面に構造物等のない海底地盤系を考える場合には、波の二次元的な影響はそれほど大きくはないと考えてよいものと思われる。同様のことは、他の観測結果からも指摘されている¹⁹⁾。

図-36は、図-35に示した波のうち、波の番号7に対する水圧比 p_m/p_b を p_b の波形の降において比較したものである。理論値は、深部においてやや大きめの値となっているが、これは、6.2で述べたように上層部が波状化した影響と考えられる。図-37は、図-36と番号の同じ波について、1サイクル中の有効応力の最大減少量 $(p_b - p_m)_{\text{MIN}}$ の深度分布を比較したものである。この場合、理論値と観測値はほぼ一致していることが分る。両者の相違は、水圧の比でとるか差でとるかによるものであるが、液状化の検討などの実用的な点では、差が重要であることを考慮すると、理論値は観測値を良く説明しているとみなしてもよいと考えられる。

なお、図-35~図-37の理論解析では、伝達係数 $\alpha = 2.0$ としているが、 α が解析結果に及ぼす感度分析を行った結果も図-36、図-37に示されている。このときの α としては、2.6を用いている。図-36、図-37によると、 α の理論値に及ぼす感度はそれほど大きくはないこと、また、 $\alpha = 2.0$ の理論値がより観測結果と一致していることが明らかである。

以上、図-35~図-37について考察してきたように、筆者らの提案している変動間隙水圧に関する理論は、碎波帯内におけるような不規則な波形に対しても、十分妥当

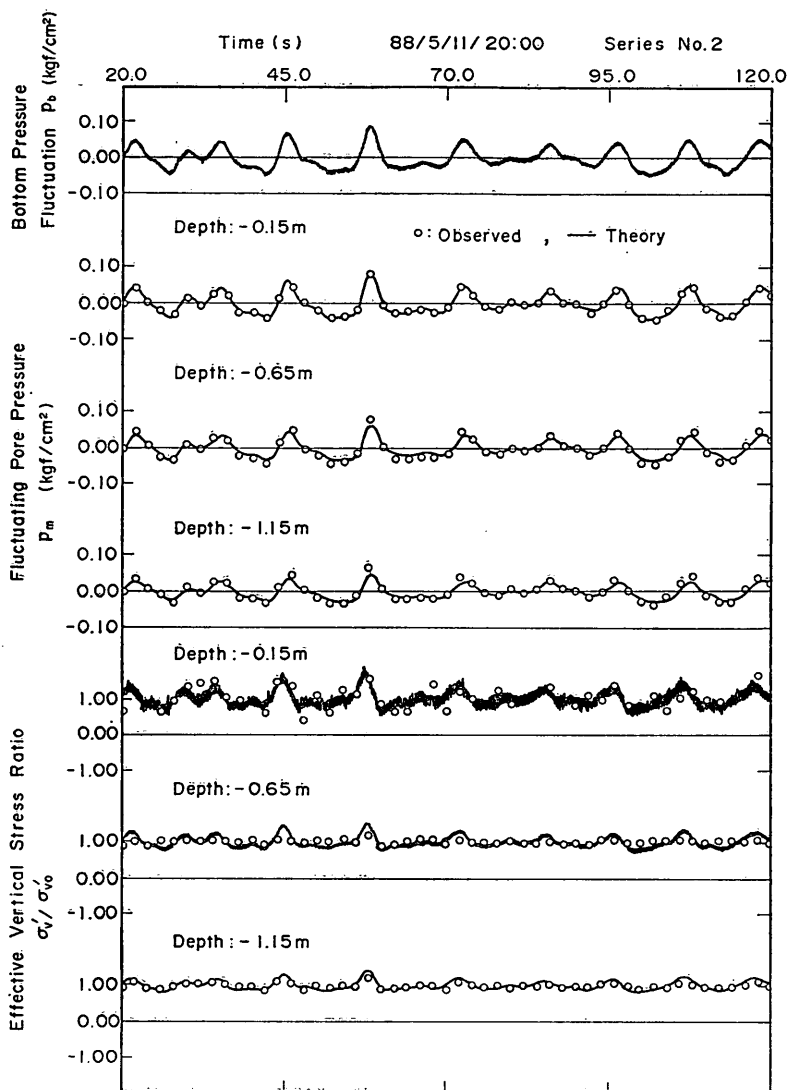


図-35 変動間隙水圧の観測値と理論値の比較 (観測シリーズ 2: $\alpha=2.0$)

な結果を与えるものと考えられる。

8. 波浪による液状化の予測方法

液状化の予測法については、既に室内実験の結果にもとづいて報告済みであるが、今回行った現地観測とその解析結果からも前回報告した方法の妥当性が検証された。基本的には、前回の提案方法⁴⁾と同様であり、ここでは、そのフローについて簡単に説明する。

液状化に支配的な要因は、海底地盤表面の水圧変動 p_b 、海底地盤中の変動間隙水圧 p_m 、静穏時の有効土被り圧 σ_{v0}' であるから、これらの3つの要因が得られれば、液状化の判定が可能である。

ば、液状化の判定が可能である。

① 海底地盤表面の水圧変動 p_b については、本報告で示したような観測値があれば理想的であるが、一般的には、液状化予測地点でのこのような観測データを得ることはかなり困難である。また、不規則な水圧波形を確定することも不可能である。したがって、ここでは、波を微小振幅波と考慮して予測を行うものとする。この仮定は、波を取扱う場合に一般に広く用いられており、実務的には、許容される精度を有していると考えられる。既に、2.2 で述べたように、微小振幅波理論によると、海底地盤表面の水圧変動 p_b は、式(10)により変動振幅 p_0 の

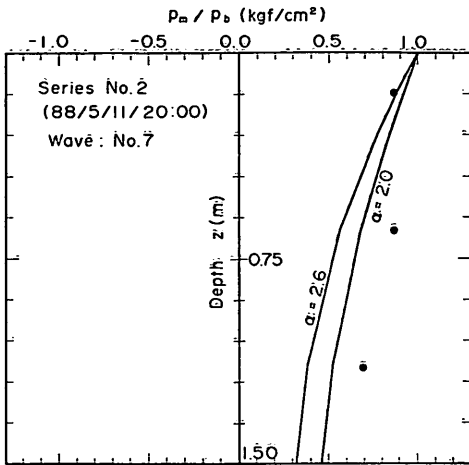


図-36 水圧比の比較

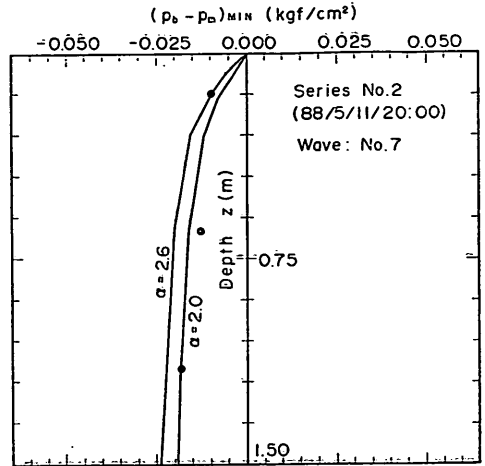


図-37 有効鉛直応力の変動量

関数として比較的簡単に求められる。一次元空間で考えると、 p_0 を求めるために必要なパラメータは、波高 H_i 、周期 T_i 、水深 h_i 、水の単位体積重量 γ_w であるが、現地の波浪観測結果などから、波高、周期が分れば p_0 が求められる。したがって、 p_0 から p_b も得られる。

② 海底地盤中の変動間隙水圧 p_m は、式(1)により計算されるが、入力定数 $C(=C_v \cdot T_i / l^2)$ 、 α については、7.2で述べた方法で求められる。境界条件については、不透水層までの砂層厚さ l を決定しなければならないが、これは土質調査結果から得られる土層断面図や土質試験結果から定める。土質調査結果が得られない場合には、 l がある値以上になると解析結果が l の影響を受けないことを利用して適切な砂層厚 l を設定する。波浪による液状化現象は、海底地盤表層部に発生することから、このような方法を用いても実務的には許容されるものと考えられる。 C 、 α 、 l を用いて式(1)を解くと p_m が得られるが、 p_m と先に求めた p_b から、変動過剰間隙水圧 $-(p_b - p_m)$ が計算される。

③ 静穏時の有効土被り圧 σ_{v0}' は、海底地盤の水中単位体積重量 γ' から式(6)で算定される。

④ 液状化の判定は、②と③で求めた $-(p_b - p_m)$ と σ_{v0}' から、式(5)を適用して簡単に行うことができる。

⑤ 以上の検討は、波の数が1波のときであるが、実際には、波の数の影響を考慮する必要がある。このときの方法として、液状化が発生した場合、その深度の砂粒子がすべて運び去られると仮定して、水深 h_i を変更し①から④の作業を繰り返す。水深 h_i が大きくなると、 p_b の影響が小さくなり、最終的には液状化しない深度

が得られるから、この深度を最大液状化深度とする。この検討は、最も安全側の結果を与えることになる。

⑥ このような作業を予想される種々の波高と周期に対して行うことにより、それぞれ最大液状化深度が求まるが、これらのうちの最大値をとると限界液状化深度が得られる。

9. 結論

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確認し、提案液状化理論の妥当性を検証した。ここで導かれた主要な結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 波浪の作用を受ける実海域の海底砂地盤中においては、有効鉛直応力が波の変動にともない逐一変動している。
- (2) 上記有効鉛直応力の変動量は、海底地盤表面の水圧変動と海底地盤中の変動間隙水圧の差として表される。
- (3) 実海域においても、波浪の作用によって海底地盤中の有効鉛直応力が0となる、すなわち、海底地盤が液状化する領域が存在する。
- (4) 海底地盤中の変動間隙水圧および有効鉛直応力変動について、観測結果と理論解析結果を比較したところ、両者は良い一致を示し、筆者らが提案している基礎方程式の妥当性が、碎波帯内の不規則波に対しても検証された。
- (5) 実海域における波浪の進行は2次元式的であるが、海底地盤表面に捨石などのない場合には、1次元式

な取扱いが可能である。

- (6) 以上の結果にもとづき、実海域における液状化現象の予測手法の提案を行った。

(1989年6月30日受付)

謝 辞

現地観測データを取得するにあたっては、運輸省港湾技術研究所の波崎海洋研究施設(HORF)を活用したが、当施設を用いて定常的な観測・研究を行っている水工部漂砂研究室加藤室長ほか同研究室各位には、多くの助言と協力を得ることができた。また、西村土質部長からは、本研究の遂行にあたって多大の励ましを戴いた。ここに記して心から感謝の意を表したい。また、本研究は、昭和61年度～昭和63年度の海岸事業調査費により実施されたものであり、関係各位に対して深甚の謝意を表する次第である。

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, 梅原靖文 (1986): 波浪による海底地盤の液状化および変形機構, 海岸構造物の基礎に関するシンポジウム, 第2編シンポジウム論文集, pp. 241~248.
- 3) 善 功企, 山崎浩之, 渡辺 篤 (1986): 波浪による海底地盤の液状化現象の実験的検証, 土木学会第42回年次学術講演会講演集, 第III部門, pp. 130~131.
- 4) 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, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 125~180.
- 5) Putnam, J. A. (1949): "Loss of Wave Energy Due to Percolation in a Permeable Sea Bottom", *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 30, pp. 77~133.
- 6) Liu, P. L. F., Timothy, P. and O'Donnell (1979): "Wave Induced Forces on Buried Pipelines in Permeable Seabeds", *Proceedings of the 4th Conference on Civil Engineering in the Oceans*, San Francisco, Calif., pp. 111~121
- 7) Sleath, J. F. A. (1970): "Wave-Induced Pressures in Beds of Sand", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 96, No. HY 2, pp. 367~378.
- 8) 井上令作 (1975): 飽和度の高い砂層における 間隙水圧の伝ば, 土木学会論文報告集, 第236号, pp. 81~92.
- 9) Yamamoto, T. (1977): "Wave Induced Instability in Seabeds", *Proceedings of the ASCE Spec. Conference, Coastal Sediments*, pp. 898~948.
- 10) Madsen, O. S. (1978): "Wave-induced pore pres-

- ures and effective stresses in a porous bed", *Geotechnique* 28, No. 4, pp. 377~393.
- 11) Okusa, S. (1985): "Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments", *Geotechnique* 32, No. 3, pp. 235~247.
 - 12) 加藤一正 (1987): 波崎海洋研究施設 (HORF), みなとの防災, 港湾海岸防災協議会, pp. 23~32.
 - 13) 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講演集, 土質工学会, pp. 1007~1008.
 - 14) 善 功企, 山崎浩之, 佐藤 泰 (1989): 波浪による海底地盤中の応力変化に関する現地観測, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 5, pp. 85~90.
 - 15) Tsui, Y. and Helfrich, S. C. (1983): "Wave-Induced Pore Pressures in Submerged Sand Layer", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. GE 4, pp. 603~618.
 - 16) 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.
 - 17) Okusa, S., Nakamura, T. and Fukue, M. (1984): "Measurements of wave-induced pore pressure and coefficient of permeability of submarine sediments during reversing flow", *Proceedings of the UTAM '83 Symposium, Seabed Mechanics*, pp. 113~122.
 - 18) 酒井哲郎, 服部明彦, 間瀬 肇 (1989): 波浪による碎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, 土木学会, Vol. 5, pp. 79~84.
 - 19) 清水正喜, 河崎尚弘, 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.

記号一覧表

C	: 排水係数
C_v	: 圧密係数 ($k/\gamma_w m_v$)
D_r	: 相対密度
h	: 水深
j	: 浸透力
k	: 透水係数
L	: 波長
l	: 層厚
m_v	: 土の体積圧縮係数
m_w	: 水の圧縮率
m_{w0}	: 完全飽和状態での水の圧縮率
N	: 波数 (波の数)
n	: 間隙率
\bar{P}	: 無次元化された変動間隙水圧 (p_m/p_0)
p_b	: 地盤表面の変動水圧
p_0	: 地盤表面の水圧変動振幅
$2\bar{p}_0$: 載荷された水圧変動両振幅

海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—

p_m	: 変動間隙水圧	γ'	: 土の水中単位体積重量
p_{mg}	: 絶対圧力で表した間隙水圧	γ_w	: 水の単位体積重量
S_r	: 飽和度	ε_v	: 鉛直ひずみ
T	: 周期	η	: 静水面からの水位変動
\bar{T}	: 無次元化された時間 (t/T)	λ	: 波数 (Wave number) ($2\pi/L$)
t	: 時間	σ_{v0}	: 初期鉛直応力
u	: 過剰間隙水圧	σ_v'	: 有効鉛直応力
\bar{z}	: 無次元化された深さ (z/l)	σ_{v0}'	: 初期有効鉛直応力 (初期有効土かぶり圧)
z	: 地盤表面からの深さ	θ	: 位相差
α	: 伝達係数	ω	: 角振動数 ($2\pi/T$)