

波による海底地盤中の間隙水圧変動に関する現地観測

中田 博昭*・鈴木 勝**・阿部 勝雄***
蜂須賀和吉****・山下 剛史*****

1. はじめに

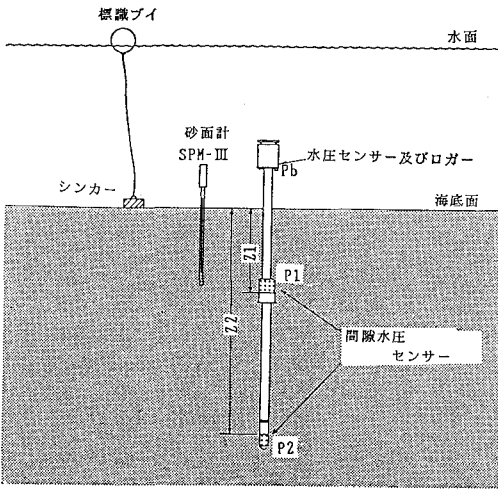
現在、海岸保全を目的とした離岸堤や突堤など構造物の多くが高波浪等により消波ブロックや堤体の沈下を起こしており、これら構造物の機能維持を図るため、多額の費用と時間をかけて嵩上げ工事を行っている。新潟西海岸における離岸堤の沈下状況を調べるために実施した孔間弾性波探査法による結果（宮本ら、1986）では、離岸堤を構成する消波ブロックが海底面下約 10 m までも沈下、散乱していることが明かになった。しかしながら、構造物の沈下機構については未解明な面もあり、現状では基礎工の安定に関する検討手法は必ずしも十分ではない。このようなブロックの沈下現象に対して善ら（1987）は、波による海底地盤中の間隙水圧の挙動に着目し、地盤の支持力減少や波による液状化について研究を行い、地盤中の間隙水の浸透特性と地盤の体積圧縮特性が過剰間隙水圧の発生に大きく関与していることを明らかにした。

そこで、我々は地盤中の間隙水圧を計測する装置を昭和61年度に開発し、計測装置の検証を含めて新潟西海岸で観測を実施してきた。なお、これらに関する報告は、先の第34・36回海岸工学講演会において報告したところである（高垣ら、1987；辻垣ら、1989）。

本報告は、新潟西海岸で昭和61年より4年間にわたり実施してきた以上の現地観測結果の取りまとめと、これに基づいた液状化予測手法について提案するものである。

2. 現地観測の概要

現地調査の概要を図一1に示した。基本的な観測項目は P_b （海底面上の水圧）、 P_1 および P_2 （地盤下の間隙水圧）である。また、 z_1 、 z_2 （各センサーの地盤深さ）



図一1 現地調査の概要

を正確に把握するため、砂面計（SP-III）等を設置し砂面高の経時変化を計測した。

なお観測時間は通常2時間毎に、各10分（0.5秒間隔で1200データ）の計測を行っている。

観測仕様を表一1、年度別調査地点を図二2に示した。観測は、日本海の冬期暴浪時に実施し、ケース①～④は計器の開発と観測データの検証を目的とし、ケース③は実際の構造物直下（消波ブロック）での取得を、さらにケース④は落堤の施工法線上でのデータ取得を目的とした観測である。

表一1 現地観測仕様

ケース NO	調 査 期 間	設 置 時 の		
		水深 (m)	Z1 (m)	Z2 (m)
①	1987, 3/11～3/21	2.0	1.5	3.5
②	1988, 2/11～2/24	5.5	2.0	4.0
③	1988, 11/22～10/26	5.4	1.0	3.0
④	1990, 3/23～4/14	7.7	0.9	2.0

* 正会員 工修 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所長
** 工修 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所次長
*** 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所調査課長
**** 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所調査係長
***** 三洋テクノマリン(株) 海岸工学室

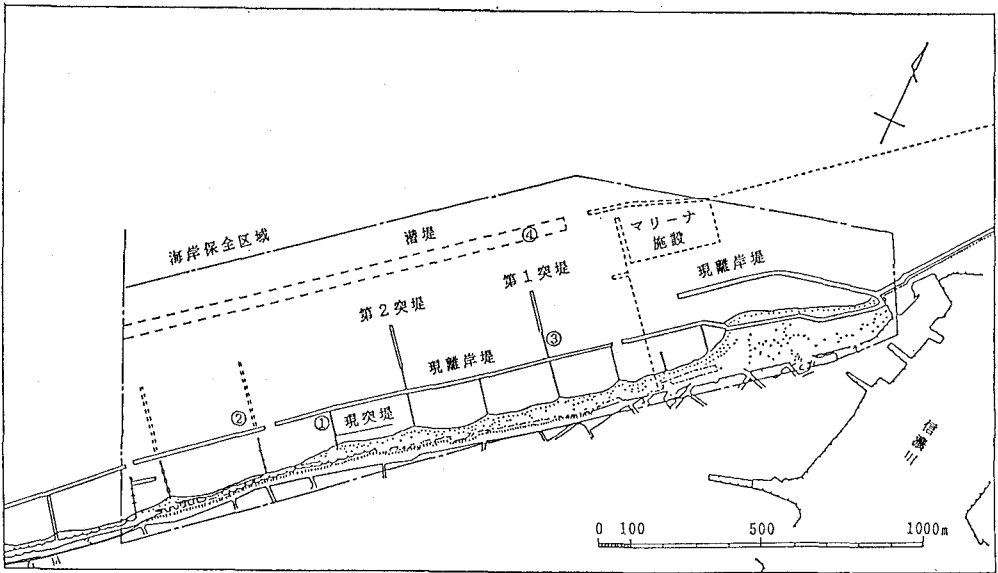


図-2 年度別調査地点

3. 現地観測結果

(1) 変動間隙水圧の地盤中への伝達率

地盤中への変動間隙水圧の伝達率 K を次式で求めた。

$$K_n(f) = (P_n(f)/P_b(f))^{1/2} \quad (1)$$

なお、ピーク周波数での K_n を 図-3 に示す。

ここに、 $P_n(f)$ は間隙水圧変動パワースペクトル、 $P_b(f)$ は海底地盤上の水圧変動パワースペクトルである。

変動間隙水圧は地盤中を減衰しながら伝達していることがわかる。周期の長い波ほど伝達率が大きく、長周期の水圧変動ほど地盤下によく伝わるのがわかる。また、伝達率はピーク周波数ばかりでなく、観測ケースによって大きく異なっている。これは、伝達率が地盤条件（透水性、地盤の圧縮性、排水距離等）に大きく依存しているためと考えられる。

(2) 過剰間隙水圧の挙動

間隙水圧変動により地盤中には過剰間隙水圧 ΔP が発生する（式（2））。この時、深さ z での地盤の有効応力 σ' は式（3）で表わされる。有効応力 σ' が負となったとき、土粒子は水中に浮遊した状態、つまり液状化状態となる。

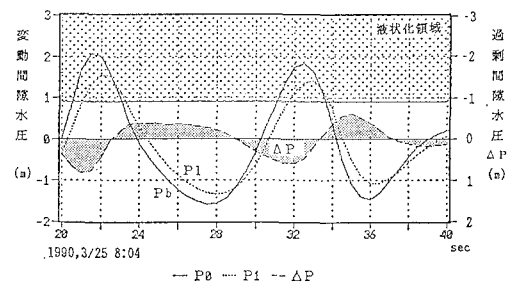


図-4 ΔP の経時変化

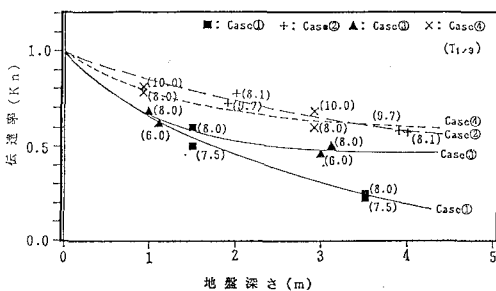


図-3 変動間隙水圧の伝達率

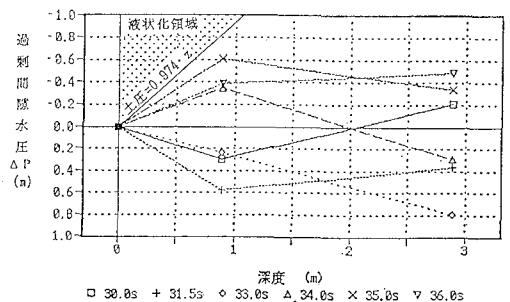
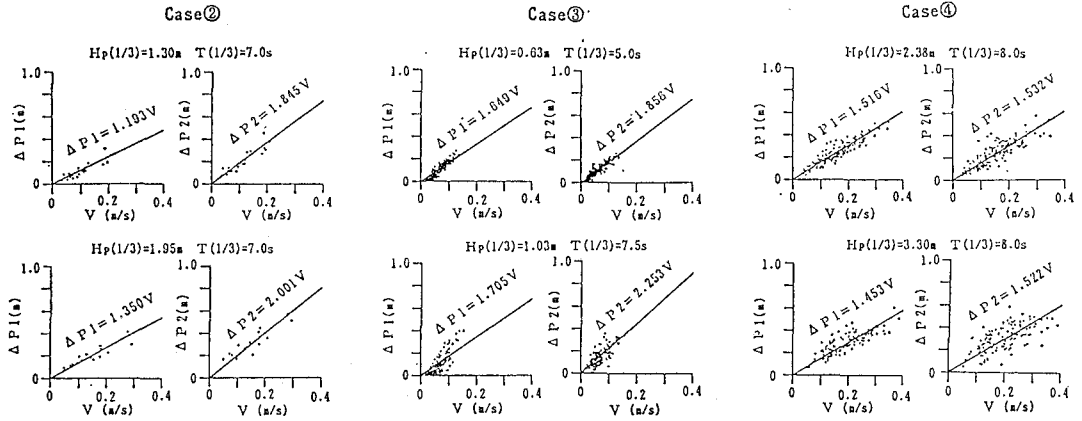


図-5 ΔP の鉛直分布

図-6 V と $\Delta P_{\max}$ の相関

$$\Delta P = P_b - P_m \quad (2)$$

$$\sigma' = r' \cdot z + \Delta P \quad (3)$$

ここに、 P_b は海底面上の変動水圧、 P_m は地盤中の変動間隙水圧、 r' は地盤の水中単位体積重量である。

ここで、液状化を発生させる過剰間隙水圧 ΔP は負の値であり、「 ΔP の最大値」とは負の最大値をとるものとする。

観測結果の一例として、ケース④での ΔP 経時変化を図-4 に、鉛直分布を図-5 に示した。これは全観測期間中 ΔP が最大値をとった事例である。

ΔP は P_b の変動に伴って、波の峰から谷へ水圧が急激に減少する時に最大値をとり、 ΔP の発生原因が水圧の急減であることが考えられる。観測における ΔP の最大値は $z_1=0.91\text{ m}$ で 0.61 m (水頭) で、静止土圧の約 70% であった。

(3) 過剰間隙水圧と水圧変化速度

海底面の水圧が急激に変化する時、過剰間隙水圧 ΔP が発生していることから、 ΔP を規定するパラメータとして水圧変化速度 V を式 (4) で定義する。

$$V = H_p / T \quad (4)$$

ここに、 H_p は海底面の変動水圧両振幅 (海底面上での水圧波高)、 T は H_p の波の周期であり P_b の経時変化より求める。

観測された 1 波海の H_p 、 T に対して V を求め、その時に発生した地盤中の過剰間隙水圧の最大値 $\Delta P_{\max}$ として 図-6 に V と $\Delta P_{\max}$ の相関を示した。これを見ると $\Delta P_{\max}$ と V の間には非常に高い正の相関関係が見られ、水圧変化速度が大きいく、つまり水圧の急減が大きいくほど、過剰間隙水圧の発生が大きいく、深さ z における V と $\Delta P_{\max}$ には式 (5) の関係 (回帰直線) が成り立っていることがわかる。

$$\Delta P_{\max}(z) = a(z) \times V \quad (5)$$

両者の相関が高波浪時に多少悪くなっているが、これは今回定義した V が水圧変化速度そのものではなく同じ V でも波形の違いにより実際の水圧変化速度がバラツキを持っているためと考えられる。

4. 液状化予測

(1) TEST 1 (V と $\Delta P_{\max}$ の相関を利用して)

式 (5) を使うと、次の方法で簡単に地盤の液状化条件を求めることができる。

- ① 現地観測より P_b 、 P_1 、 P_2 、 z_1 、 z_2 を計測する。
- ② 式 (2) (4) より V 、 $\Delta P_{\max}$ を求める。
- ③ V と $\Delta P_{\max}$ の回帰直線より、式 (5) における a を求める。
- ④ 任意の V を与えて $\Delta P_{\max}(1)$ 、 $\Delta P_{\max}(2)$ を求める。
- ⑤ $\Delta P_{\max}$ の深度分布を求める。
- ⑥ 式 (3) より $\sigma' < 0$ の時、液状化と判定する。

観測地点での代表波浪である $H_0=3.0\text{ m}$ 、 $T_0=8\text{ sec}$ の波が襲来したときの液状化予測の計算をした。計算に使用する V は、まず計算地点での波高を波浪変形計算により求め、最大波高を海底面上の水圧変動に直して H_p を求め周期で割った。表-2 に計算結果を、図-7 に $\Delta P_{\max}$ の鉛直分布を示した。液状化深度はケース③の離岸堤付近で最も大きく 0.8 m で、ブロックの沈下現象とも対応している。また、潜堤付近のケース④では 0.5 m の液状化、ケース②では液状化しないという結果となった。

(2) TEST 2 (善らの基礎方程式を解く)

TEST 1 の検証のために、式 (6) に示した善ら (1987) の間隙水圧に関する基礎方程式より P_m を求め、式 (2) および (3) から同様な条件での液状化深度を計算した。

表-2 液状化深度の計算

	沖 波		岸 波			HP (m)	V (m/s)	液状化深さ
	H_0 (m)	T (sec)	水深 (m)	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)			
②			5.5	2.8	5.0	4.2	0.53	0.0
③	3.0	8.0	5.4	2.8	5.0	4.2	0.53	0.8
④			7.7	2.9	5.2	4.2	0.53	0.5

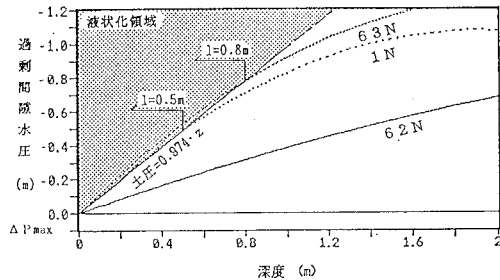


図-7 ΔP_{max} の鉛直分布と液状化深さ

$$C_v \frac{\partial^2 P_m}{\partial z^2} = \alpha \cdot \frac{\partial P_m}{\partial t} - \frac{\partial P_b}{\partial t} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_v は圧密係数 ($k/\gamma\omega m_v$)、 k は透水係数、 $\gamma\omega$ は水の単位体積重量、 m_v は土粒子骨格の体積圧縮係数、 α は伝達係数である。

ａ) 計算パラメータ (C_v , α) の設定

C_v は透水試験および、体積圧縮試験より求めた。 α は室内試験結果から直接的に求めることができないので、善らと同様に、現地観測結果とのフィッティングを

行った。

例として、図-8 にケース③の P_m の実測値と計算値を示した。現地波浪に伴う不規則な P_m の変動に対してもパラメータを適当に設定することにより、変動間隙水圧が精度良く再現されており、基礎方程式の妥当性がたしかめられた。同様に各ケースとも P_m を計算して α を決定し、表-3 に示した。

ｂ) 初期条件及び境界条件

初期条件は

$$t=0 \text{ で } P_m=0$$

境界条件は

$$z=0 \text{ で } P_m=(H_p/2) \sin (2\pi t/T)$$

$$z=l \text{ で } \frac{\partial P_m}{\partial z}=0 \quad l: \text{砂層圧}$$

である。

ｃ) 計算条件

波浪条件は TEST 1 と同様で $H_p=4.2\text{m}$ 、 $T=8.0$ 秒とし、 l は付近のボーリング結果より求めた。計算条件を、表-3 に示した。

ｄ) 計算結果

基礎方程式を解いて得られた P_m より、式 (2) より

表-3 数値計算パラメータ

ケース	C_v	α	l
②	1.06 m^2/s	1.6	5.0m
③		2.6	7.0m
④		2.0	3.0m

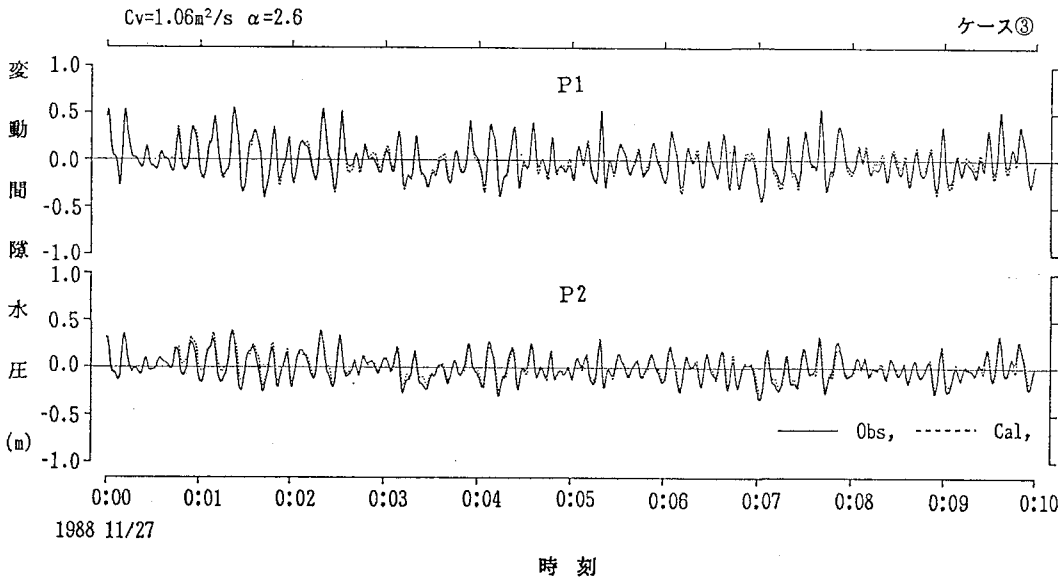


図-8 P_m の実測と計算値

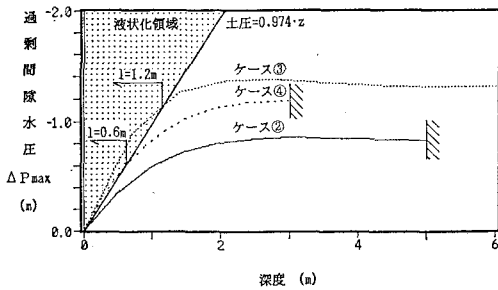
図-9 数値計算による ΔP の鉛直分布

表-4 液状化深度

ケース	HO	TO	TEST 1	TEST 2
			液状化深度	液状化深度
②	3.0m	8.0 sec	0.0m	0.0m
③			0.8m	1.2m
④			0.5m	0.6m

ΔP を計算し、その鉛直分布を 図-9 に示した。また式 (3) より液状化深度を計算し、TEST 1 の結果とともに 表-4 に示した。液状化深度は数値計算の方が若干大きいものの、両者はよい対応をしており、簡単な TEST 1 による方法でも液状化予測に十分な結果が得られることがわかった。

5. ま と め

これまでの現地観測結果より以下のことが明らかになった。

- ① 地盤中の間隙水圧変動は深さが大きくなるほど、また波周期が小さいほど、その伝達率は小さくなっている。
- ② 地盤中の過剰間隙水圧増加の原因は海底面の水圧の急激な減少である。

- ③ 現地観測結果に基づく簡単な液状化予測の手法 (TEST 1) を提案し、基礎方程式の解 (TEST 2) と比較し、ほぼ妥当な結果を得ることができた。

間隙水圧に関する基礎方程式を解くためには、地盤条件を与えなければならないが、一般的には現地盤の透水性や体積圧縮係数、飽和度等を正確に求めることは非常に困難である。従って、現地観測の必要はあるが、簡単に液状化条件を求めることができるこの方法は、現時点においては十分有用性があるものと考えられる。

今後は各種地盤定数や基礎方程式等の理論解との整合をはかり、現地観測結果の一般化を行い、液状化した時の砂やブロックの挙動や液状化防止工法等に関する研究を重ねていきたい。

最後に現地観測、データ解析等において貴重な助言を頂いた港湾技術研究所土質部動土質研究室 善室長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 高垣泰雄・宮本卓次郎・吉永 茂・春木芳男・佐藤峰雄(1987): 海底砂地盤の間隙水圧の波浪変動に関する計測装置の開発と現地観測結果について、第34回海岸工学講演会論文集, pp. 276-280.
- 辻垣武彦・北山 優・春木芳男・蜂須賀和吉(1989): 波によって変動する海底砂地盤間隙水圧の現地観測、第36回海岸工学講演会論文集, pp. 779-783.
- 宮本卓次郎・吉永 茂・曾我富士雄・清水謙吉・川又良一・佐藤峰雄(1986): 孔間弾性波探査法による離岸堤埋没状況に関する考察(2)、第33回海岸工学講演会論文集, pp. 427-431.
- 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.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰(1989): 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—、港研報告第28巻, 3号, pp. 29-57.
- 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.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰(1990): 波浪による液状化にともなう離岸堤の変形に関する考察、海洋開発論文集, 土木学会, Vol. 6, pp. 223-228.