

# 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

高垣 泰雄\*・宮本卓次郎\*\*・吉 永 茂\*\*\*  
春木 芳男\*\*\*・佐藤 峰雄\*\*\*\*

## 1. はじめに

離岸堤のような海岸構造物では、波浪等の作用による沈下現象を生じ、維持嵩上げを余儀なくされる事例が多い。この沈下現象の代表的な事例である新潟西海岸における離岸堤の沈下状況について、孔間弾性波探査法による調査結果を中心として第 32 回及び第 33 回海岸工学講演会に既に報告している<sup>1)</sup>。この報告では、離岸堤を構成している消波ブロックが海底面下、10 m 程度までも沈下している状況を明らかにしている。

このような沈下対策として、今日捨石基礎（グラベルマット）等を行っているが、構造物の沈下機構について未解決な面もあり、基礎工に関する検討手法が必ずしも十分であるとはいえないのが現状である。

一方、海岸構造物の沈下機構に関しては、水位上昇により生ずるパイピング現象に着目した堀川の研究<sup>2)</sup>や波浪による外力、水圧変化による海底地盤中の間隙水圧の変化に着目した善の研究<sup>3)</sup>などあり、いずれも海底地盤中の水の挙動に着目している。

これらのことから、海岸構造物の沈下機構の解明に資するため新たに海底砂地盤中の間隙水圧計測装置（以下「計測装置」という。）を開発するとともに新潟西海岸において試験観測を実施した。

本研究は、この現地試験観測結果に基づき、計測装置の信頼性を検討するとともに海岸構造物の沈下現象との関連における波浪中の砂地盤の挙動及び計測装置の有効性について考察したものである。

## 2. 計測装置の概要

計測装置の概要を図-1に示す。計測装置は、センサー部と記録部とをパイプで結合し一体の杭状に構成したものである。記録部は、データサンプリング時間間隔等にもよるが、2週間程度の現地観測データの記録を行う容量能力を有する。センサー部は、応答時間1ミリ秒の可変容量式水圧計を基本としており、これを縦に配置す

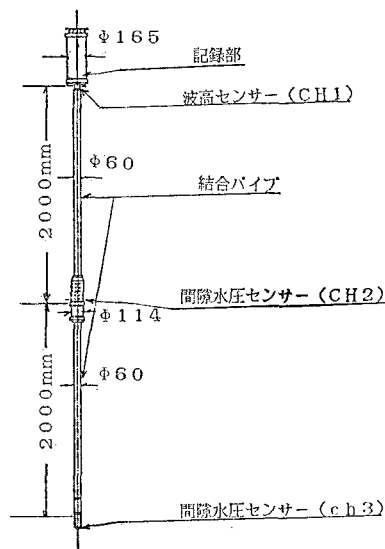


図-1 間隙水圧計測装置

ることにより、海底面上及び海底面下の水圧変動を同時に計測する。なお、海底面下に設置する水圧計については、砂の粒径を考慮した剛性の高いフィルターによって保護されている。

また、この計測装置では、現地での運用を容易とするため記録部、センサー部及び結合パイプに分解することができる。これにより組み合わせや結合パイプの変更等によりセンサー個数、センサー間隔の変更も容易に行うことができる。

今回の場合には、図-1に示したとおり、センサーを3個、2m間隔で配置したものとなっている。

## 3. 現地調査

昭和62年3月、新潟西海岸の離岸堤背後、水深1m位置に計測装置を設置した。水圧センサーは海底面上の0.5m、海底面下1.5m及び3.5mの箇所にある。計測は2時間ごと、1秒間隔、300データを取得するものとし、10日間の観測を行なった。この観測期間中に大きな時化があり、離岸堤背後であったにも係らず1m近い波高のデータを得ることができた。観測データを図-2

\* 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所次長

\*\* 正会員 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係長

\*\*\*\* 三洋水陸測量株式会社海象部

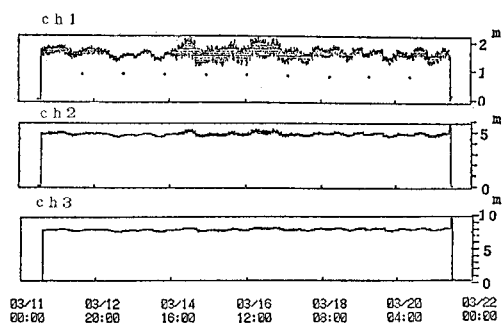


図-2 圧力水頭経時変化

に示す。

#### 4. データ解析

この観測データについて、波浪による水圧変動の海底面下への伝達特性に着目してスペクトル解析及びゼロアップクロス法による統計解析を行った。その解析フローを図-3に示す。

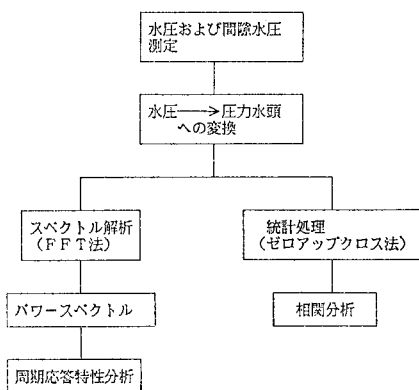


図-3 計測データ解析フロー

これらの解析の主要な結果を以下に述べる。

##### (1) スペクトル分析結果

パワースペクトル分析結果の一例を図-4に示す。解析した全てのデータについて海底地盤中の間隙水圧変動と海中の水圧変動のパワースペクトルのピーク値周期がよく一致しており 10 秒前後となっていることから、間隙水圧変動が波浪により生じることが確認された。

##### (2) 伝達率

海底面上の水圧変動を入力値とする海底面下への水圧変動の伝達率をパワースペクトルから周期応答特性として求めた。代表的な解析結果を図-5に示す。

図-5に示した3ケースの解析結果のうち CASE 1 は、海底面上の水圧変動が有義波高に換算して 0.19 m 程度と比較的小さい場合であり、CASE 2, 3 は、海底面上の水圧変動が有義波高に換算して 0.5 m 程度と大きい場合である。間隙水圧の海面上の水圧変動に対する周期応答特性は、水圧変動が小さい CASE 1 に比べて水圧変動が大きい CASE 2, 3 の方がより広い周波数帯において安定している。しかし水圧変動のパワースペクトルのピーク値周期近傍では、CASE 1 の周期応答特性も CASE 2, 3 に近い値も示す。これは、海底面上の水圧変動のパワースペクトル値が小さい周期帯では、分母、分子とも小さい値となり、計測及び解析上の誤差が大きく表われることによるものと考えられ、パワースペクトル値が大きい CASE 2 及び 3 におけるパワースペクトルのピーク周期近傍 2.5~100 sec の周期応答特性を真の値と考えればよいと判断される。

これにより、海底面上の水圧変動の海底地盤中への伝達率は、周期に左右され、周期が大きくなる程大きくなること、また地盤深度が大きくなるに従い伝達率が減少することが確認された。このような傾向は既往の研究結果とも合致するものである。統計解析結果の一例を図-

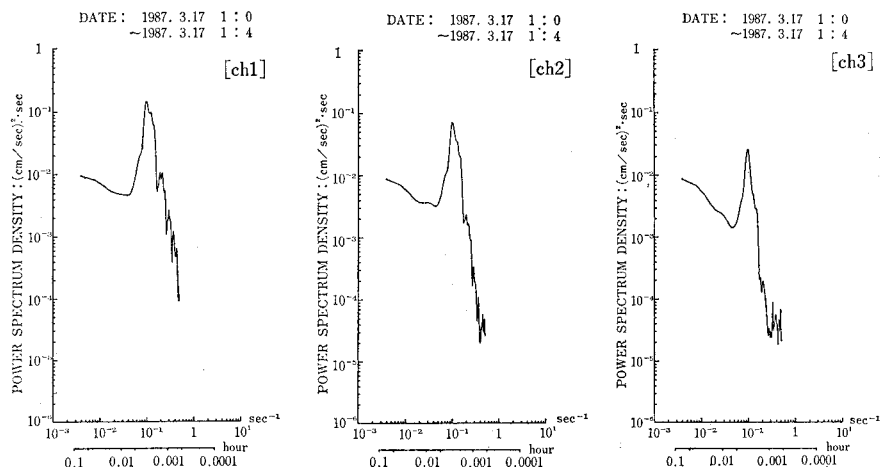


図-4 パワースペクトル解析

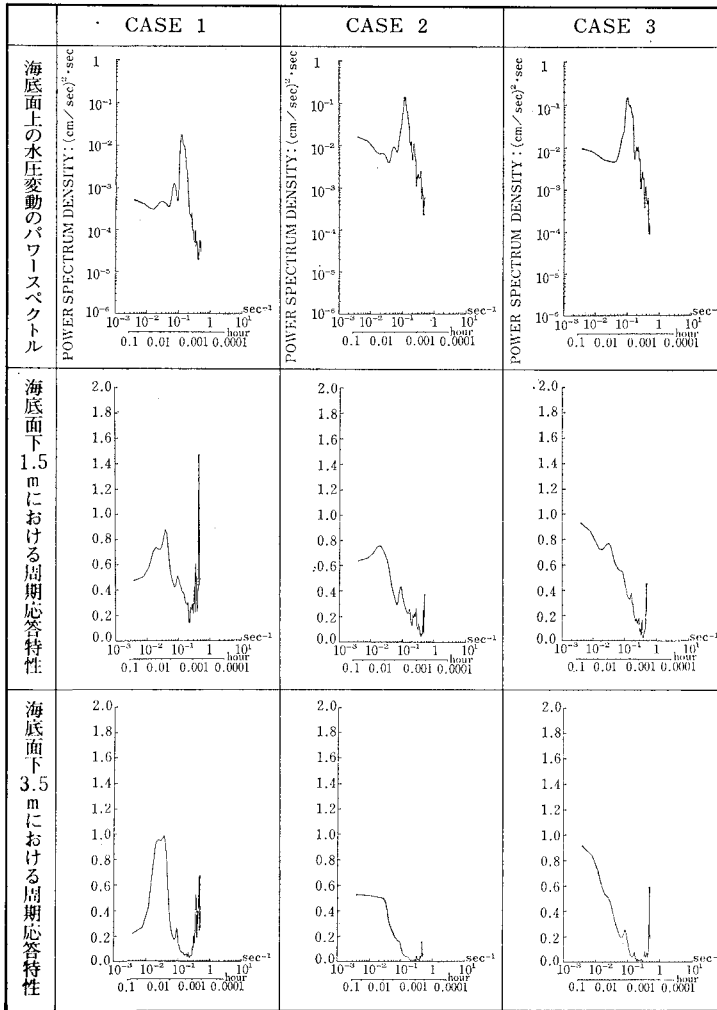


図-5 スペクトル解析結果 (2)

6 に示す。

統計解析により、水圧変動の振幅の最大値等の相関分析を行ったが、全ての解析結果について極めて高い相関性があった。このことは、スペクトル解析による周期応

答特性の解析結果と整合するものである。

### (3) 遅延時間

コヒーレンスとフェーズの算定結果を図-7に示す。

解析結果を見る限りにおいて必ずしも有意な遅延時間を見い出せなかった。これはデータのサンプリング間隔を1秒としたためと考えられる。

## 5. 考 察

### (1) 計測データの信頼性

今回、開発した計測装置について、水圧計、データレコーダー等の機器の性能、信頼性は十分であるとし、現地計測において考え得る問題点等について以下に考察することとする。

#### a) パイプに沿った水の流れ

まず、パイプに沿った水の流れがあった場合には伝達率を過大に評価することとなる。しかし底質の平均粒径が0.2 mm程度で均質であり、パイプに沿った部分についても設置後容易に現地盤と同様の締め具合になると考えられること、平滑なパイプ面に接した極めて局所的な部分で空隙率が大きくなるが、水圧変動の伝搬の過程での周辺地盤の空隙水圧との差を生じた場合、水平方向の流れを生じることによってその影響が下方に伝わり難くなる

ことが予想される。よってセンサー部では、周辺地盤の空隙水圧を計測し得るものと考えられる。

なおこの点に関してより信頼性を高めるためにはパイプに適当な粗度を与えること、或いはゴムのような柔軟なものでパイプ被覆することなどの対策を今後検討したい。

#### b) 空隙水圧計測部のフィルター内への気泡の混入

フィルター内に気泡が混入した場合には、伝達率を過小に評価することとなる。しかし、これについては計測装置を設置する前に十分な気泡抜きを行うことで対処することができる。

#### c) 海面上の記録部等に働く波力による装置の杭としての挙動

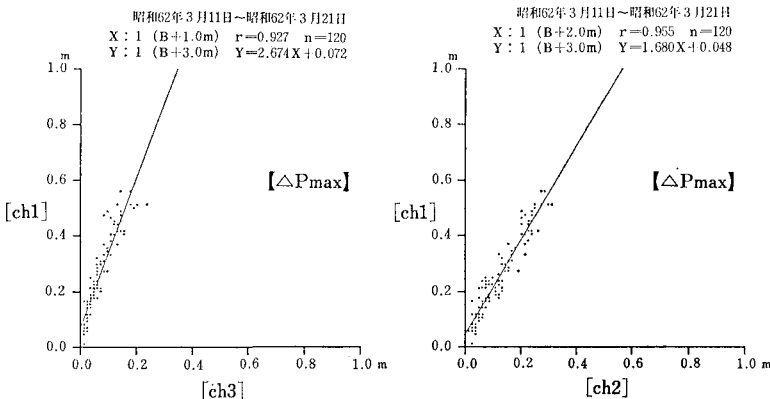


図-6 圧力水頭変化の各層間の相関

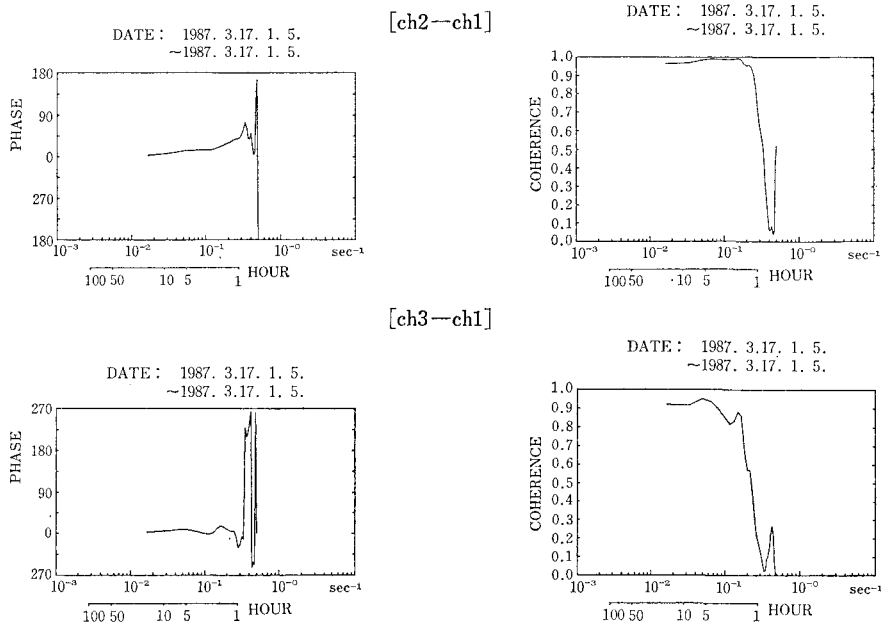


図-7 コヒーレンスとフェーズ

計測装置が杭状の構造体であることから波浪による水平外力により計測値に異常を生じることも考えられる。ただし今回の場合には有義波高が最大で1m程度であったことから海底面上に突出した部分に働く波力の影響は軽微であると考えられる。

なお、今後より高波浪域での計測を行うとする場合には、十分な配慮が必要であり、計測装置の根入れ長、パイプの剛性等を検討する必要があるだろう。

## (2) 間隙水圧の伝達特性による地盤の有効応力の減少

波浪による海底面の圧力変動が海底地盤中へ減衰しながら伝達されることによって、海底地盤中の有効応力が変動し、海底地盤の液状化まで生じる可能性があることについては、既に善の研究<sup>3)</sup>において指摘されているところである。

即ち、海底面上における水圧変動の振幅を  $p_0$ 、周期を  $T$  とし、海底面からの深度を  $z$  とすると現地計測の結果当該地盤における水圧変動の伝達率は、周期及び深度の関数として  $f(T, z)$  と定義され、海底面と地盤中の鉛直方向の力のつり合いから、深度  $z$  における地盤中の有効応力  $\sigma'_v$  は式 (1) で表される。

$$\sigma'_v = \gamma' z + [(1 - f(T, z))] \cdot p_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに  $\gamma'$  は底質の単位体積重量である。

式 (1) より、有効応力の最小値を求めると式 (2) のとおりとなる。

$$[\sigma'_v]_{\min} = \gamma' \cdot z - [1 - f(T, z)] p_0 \quad \cdots \cdots (2)$$

この  $f(T, z)$  については、海底面から地盤の不透水層までの距離、土の体積圧縮係数、透水係数等の諸係数を定めることにより、理論的にも算定することが可能であるが、本研究で述べた計測装置による現地観測データがあれば、スペクトル解析等によって、簡便かつ高精度に定めることができる。

また、式 (2) における  $p_0$  については、現地の波浪条件より定めることができる。

これらにより、波浪による海底地盤の有効応力の減少を容易に予測、評価できると考えられる。

## (3) 有効応力の減少による支持力の低下及び地盤の液状化

砂地盤では、有効応力が減少すれば急減な支持力の低下を招き、有効応力が無くなった状態では地盤の液状化を生じる。

支持力の低下について砂地盤における浅い基礎の支持力算定式<sup>4)</sup>により考察することとする。

砂地盤の許容支持力算定式を式 (3) に示す。

$$q_a = \frac{1}{F} (\beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D N_q) + \gamma_2 D \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに  $q_a$  は許容支持力、 $B$  は基礎の最小幅、 $D$  は基礎の根入れ深さ、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  は各々基礎底面から下及び上の地盤の土の単位体積重量を、 $F$  は安全率を、 $N_\gamma$ 、 $N_q$  は支持力係数 (図-8) を、 $\beta$  は基礎の形状係数を示す。

式 (3) は砂地盤のせん断変形を想定したものであり、砂地盤のせん断強度は有効応力と内部摩擦係数の積となることから、有効応力の減少はみかけ上の内部摩擦係数

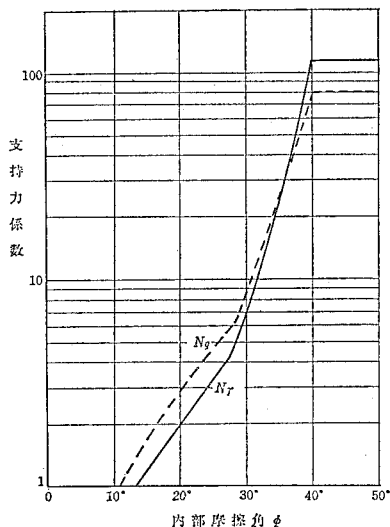


図-8 支持力係数

の減少として取り扱うことができる。図-8 は内部摩擦角と支持力係数の関係を示しており、通常砂の内部摩擦角を  $30^\circ$  とすれば、有効応力が 50% 減少した場合、みかけ上の内部摩擦角は  $16^\circ$  となり、支持力係数では 20% 以下に減少してしまうことになる。

浅い基礎の支持力算定式を以て単純に消波ブロックで構成される離岸堤の許容支持力を検討することはできないと考えられるが、構造物の上載荷重が均等に砂地盤に伝達されない場合には、式 (3) における基礎の最小幅  $B$  も小さくなることから、波浪による有効応力の減少により、構造物の上載荷重が地盤の許容支持力を上廻る事態が容易に生じることとなる。

更に、波浪による有効応力の最小値は、波の谷によって生じることから、地盤の支持力が最小となった時、同

時に構造物の上載荷重は最大となる。

これらのことによって、離岸堤等の海岸構造物の沈下が進むと考えられる。また本報告書では沈下の原因として支持力の減少に着目して考察したが有効応力の減少はバイピング現象も生じ易くすることは容易に推察されるところでありバイピング現象に着目した堀川<sup>2)</sup>の研究とも本研究は矛盾しないものと考えられる。

### 3. ま と め

本研究の結論は以下のとおりである。

- (1) 今回開発した計測装置は信頼性があるものと考えられる。
- (2) 試験観測結果より現地における波浪により生じる海底面上の水圧変化の地盤中への伝達特性が明らかとなった。
- (3) 波浪による水圧変動が地盤中へ減衰しつつ伝達することにより地盤の有効応力が減少し、許容支持力が急激に減少するものと考えられる。

なお本研究では、地盤の間隙水圧の変動と海岸構造物の沈下現象との関係についての考察が、定性的なものにとどまったが、今後は沈下現象についてのより定量的な検討を行うとともに、沈下現象を防止するための適切な基礎工法の検討を行ったこととしている。

### 参 考 文 献

- 1) 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：孔間弾性波探査法による離岸堤の埋設状況に関する考察 (2)，第 33 回海岸工学講演会講演集，pp. 427～431，1986。
- 2) 堀川清司：潜堤に関する研究 (II)——沈下機構ならびに維持——第 6 回海岸工学講演会講演集，pp. 114～120，1959。
- 3) 善 功企：海洋開発における波と海底地盤の動的問題，昭和 59 年度港湾技術研究所講演集，pp. 77～133。
- 4) 日本建築学会編：“建築基礎構造設計基準，同解説” (昭和 50 年)，p. 112。