

砂移動と砂層内応力の現地観測による検討

前野 賀彦* ・ 阪東 浩造** ・ 秋山 義信***
矢部 興一**** ・ 唐内 仁司*****

1. はじめに

沿岸域に設置される海岸構造物の基礎地盤の耐波安定性や海岸の侵食対策の検討において、砂移動のメカニズムを明らかにすることは重要である。従来より砂移動メカニズム（漂砂モデル等）に関する研究は室内実験・現地調査により多数行われている。しかしながら、水理実験については縮尺効果の影響や現地条件の模倣が難しいといった面に問題が残されることが考えられる。一方、現地調査においても、砂層表面における計測の難しさから、砂捕捉器による砂移動量や地形の経時変化といった砂移動の結果として得られる量に着目することが多い。このため、平均的な議論はできるものの、局所的で時々刻々の砂移動機構に着目した研究は少ない。

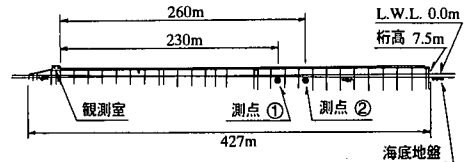
そこで、現地調査において、計測の困難が予想される砂層表面ではなく、砂層内部で動間隙水圧や有効土圧を計測することにより砂層表面の状況を把握する計測が、善ら（1989）、鶴谷ら（1990）、前野ら（1993）により、運輸省港湾技術研究所波崎海洋観測施設において実施されている。善ら（1989）は、土圧と動間隙水圧について計測を行い、有効鉛直応力（鉛直土圧と動間隙水圧の両者の差として評価）が波により変動することを報告している。鶴谷ら（1990）は、砕波帯内で計測を行い、液状化が発生すると考えられる動間隙水圧の上昇した状態で浮遊砂濃度が上昇することを確認した。また、前野ら（1993）は有効土圧と動間隙水圧を現地で直接計測できるセンサーを開発し、それをを用い砕波帯外（水深約6m）で計測を行い、波の位相と有効土圧の関係や砂層の変動状況を推測できることを確認した。

そこで、今回の計測では砂移動機構解明をさらに進めるための基礎データの蓄積を目的として、前野ら（1993）が開発した有効土圧計および動間隙水圧計を用い、砕波の影響を強く受け激しい砂移動が生じるパー周辺の水深の浅い領域の二箇所に計測点を設け、長時間連続測定さ

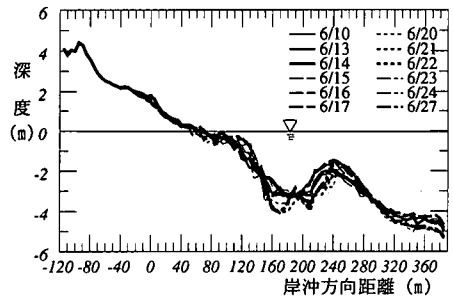
れた現地データを収集し、砕波帯内の波による砂層内の応力応答特性について検討を行った。

2. 現地観測の概要

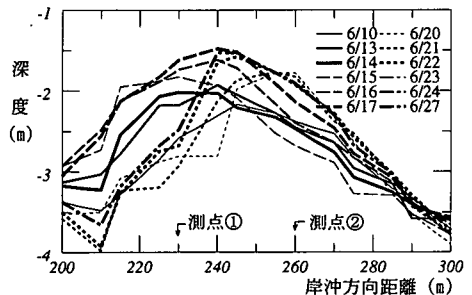
計測は茨城県鹿島郡波崎町須田浜地先の運輸省港湾技術研究所波崎観測施設の棧橋を利用して行った。図一1に棧橋に対する計測機器設置位置を、図一2に計測期間中の代表的な岸沖方向の全体の断面形状と測定位置近傍の断面形状について運輸省実施の深淺測量を示す。今回



図一1 測定位置



a) 全体



b) 測定位置近傍

図一2 海底地形岸沖縦断面図

* 正会員 農博 日本大学教授 短期大学部建設学科
** 正会員 Ph.D. 鹿島建設株式会社技術研究所
*** 正会員 工修 鹿島建設株式会社技術研究所
**** 工修 株式会社ニューテック
***** (株)共和電業 技術本部技術部

表-1 計算項目

項目	使用計測機器	備考
動間隙水圧	動間隙水圧計	設置砂層内深度 1.0 m
有効土圧	有効土圧計	設置砂層内深度 1.0 m
水圧	水圧計	設置海底面上方 1.0 m
水面波形	超音波式波高計	空中発射型
	容量線式波高計	
流速	平面 2 方向電磁流速計	設置海底面上方 1.3 m
風向・風速	プロベラ式風向風速計	汀線基準より 385 m 位置
水深	重鎮投下方式	1 日に 1 回実施

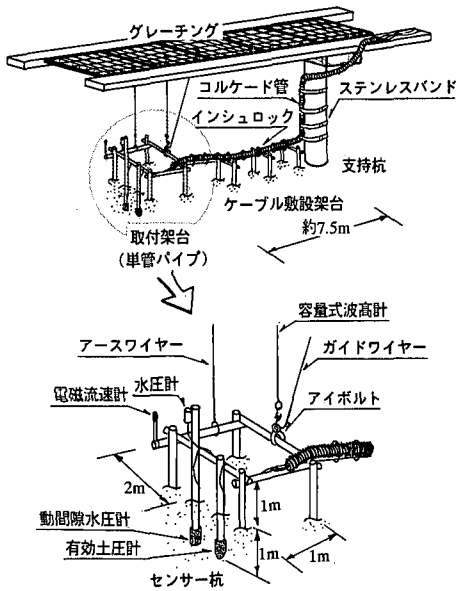


図-3 計測方法

の計測では、波と砂の応答の直接的な関係を調査するほか、距離の離れた地点での相互関係の検討も考え、図-2にも示す様に、バーの頂上を挟んで岸沖方向に 30 m 離れた二箇所（計測室より沖側 230 m と 260 m 地点、設置時水深 -2.58 m、-2.38 m）の海底面に各種計測機器を設置した。

計測項目および使用計測機器を表-1に示す。260 m と 230 m 測点の設置機器は同一とした。表中の、有効土圧計および動間隙水圧計は、前野ら (1993) が開発したフレキシブルフィルターを利用した差圧計タイプのセンサーを使用した。有効土圧は水平方向の成分について計測を行った。また、表中の超音波式波高計・風向風速計は運輸省が棧橋に設置しているもので、データを使用させて頂いたものである。

計測機器の設置方法を図-3に示す。はじめに単管パイプを組み合わせたフレーム式の架台を棧橋支持杭ス

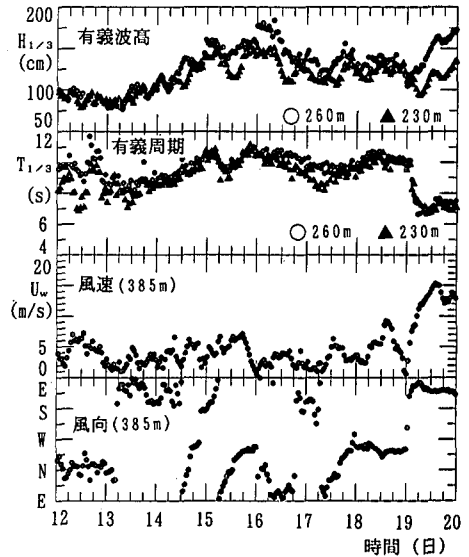


図-4 入射波計測結果

ンのほぼ中央部の海底面に固定を行い（4本脚の根入れ長 2 m、根入れはウオータージェットにより実施）、この架台に有効土圧計・動間隙水圧計および水圧計・電磁流速計・容量線式波高計を設置し、有線式でデータの取り込みを行った。なお、有効土圧計および動間隙水圧計の設置深度は 1.0 m とした。計測は、50 分間連続で行い、データの記憶媒体への書き込み時間約 2 分間の間をおいて、再び 50 分間連続で計測を行うという形の繰り返しでデータの取得を行った。データのサンプリングは 10 Hz とした。計測期間は、260 m 測点が 1994 年 6 月 12 日から 26 日の 15 日間、230 m 測点が 6 月 12 日から 15 日の 4 日間である。

3. 計測結果と考察

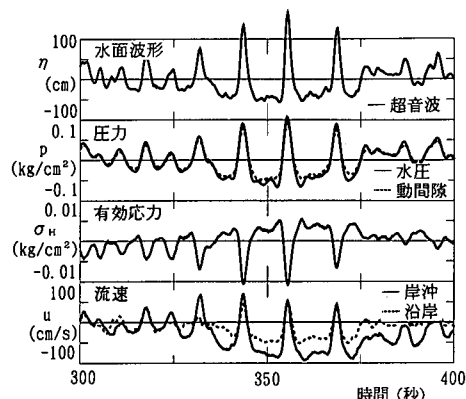
3.1 入射波の状況

計測期間内の入射波の有義波高、有義周期、風向・風速の計測結果を図-4に示す。有義波高で 2 m クラスの高波浪が 2 回来襲していることがわかる（15 日の有義周期 10 秒のうねり性の波と 19 日の風速 15 m/s の東風により生じた有義周期 8 秒の風波性の波）。

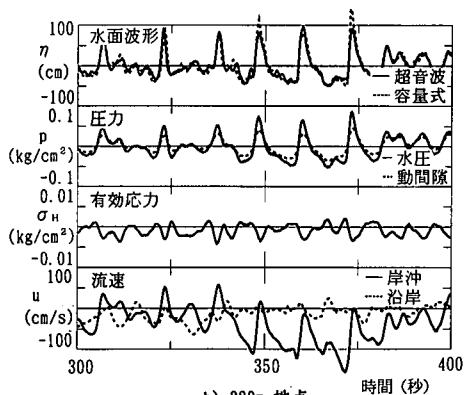
3.2 時系列波形

計測期間内の砂層内応力の代表例としてうねり性の波が来襲した 15 日 01:17 の各種の時系列波形を図-5に示す。

それによれば、動間隙水圧や有効土圧は水面波形に応じた応答を示している。既往の室内実験や前野ら (1993) の水深が 6 m と深い砕波帯外での計測では、水面波形と動間隙水圧で位相差が生じることが確認されているが、今回の計測では顕著な位相差は生じなかった。これは、



a) 260m 地点



b) 230m 地点

図-5 時系列波形

碎波帯内では砂移動が定常的に生じる場所であることを考えると、砂層は液状化しやすい緩んだ状態にあり、底面水圧が間隙水圧に瞬時に影響を与えたためと考える。それにより、水面波形のピークにおいて間隙水圧が急激に上昇し、逆に有効土圧が低下し瞬間的に表面より約 30 cm (0.01 kg/cm^2 の有効土圧変動が砂層 29 cm に対応、検定値については後述) の部分が液状化もしくは浮遊状態となっていることが予想される。

水面波形と動間隙水圧との間に位相差がないことは、水面波形が zero-down する瞬間において、浮遊砂による影響を無視すれば、動間隙水圧も零となることを意味するものとする。このような仮定に基づけば、水面波形の zero-down 時点の有効土圧の指示値には、波による水圧変動の影響が含まれないことになり、その指示値は水中土被り厚さに対応するものと考えられる。これは、個々波による地形変化を測定できる計測器として有効土圧が利用できることを示唆している。

また、砂移動に対しては大きな波列を含む波群の役割が認められる。それは、図-5 より、260 m 測点で顕著であるが、大きな波列の作用前、作用中、作用後の平均的な有効応力レベル（つまり砂層レベル）を比べると、作

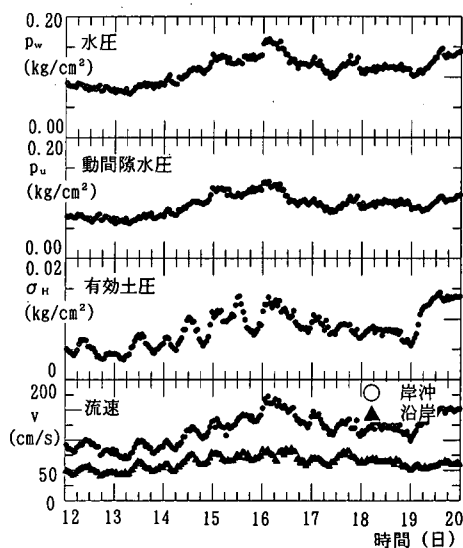


図-6 有義応答値の時間変化

用中において堆積傾向となり、作用後に作用前の状態に回復する傾向が確認される。

なお、計測箇所の場所の違いによる変化に関しては、明確な相違点は確認されなかった。

今回の現地計測で得られたこれらの時系列データをさらに解析することにより、波の位相に対応した砂層の圧縮（高密度化）・液状化・浮遊状態・移動状態に変化する一連の底質移動の様子を予測できるものとする。

3.3 砂層内応力の有義応答値

図-6 に 260 m 地点における各種データの波浪に対応した変動の有義応答値（両振幅の $1/3$ 最大値、個々波の定義は zero down cross 法によった）の時間変化を示す。有義応答値の算出は 50 分の時間波形の処理により実施した。動間隙水圧および有効土圧の有義応答値は波高の増減にともない変動する傾向が見られる。

図-7 に 260 m 地点の動間隙水圧と有効土圧の有義応答値と 260 m 地点の有義波の波形勾配との関係を示す。図中の記号の違いは水深（センサーから見れば設置深度）の違いを示すもので、19 日以前が約 2.4 m（設置深度 1.0 m）、19 日以降が約 1.2 m（設置深度 2.2 m）に変化しているのに対応している。動間隙水圧および有効土圧の有義応答値とも、19 日以前と以降のデータで傾きは変わるが、波形勾配に比例して増大していることがわかる。傾きの違いは設置深度の差で 19 日以前の浅い時の方が傾きが大きく砂層内における減衰が小さいことを示す。また、動間隙水圧に比べ、有効土圧は設置深度における差が小さい。

3.4 砂層内応力の平均値

ここでいう平均値とは 50 分間の出力値の単純平均値

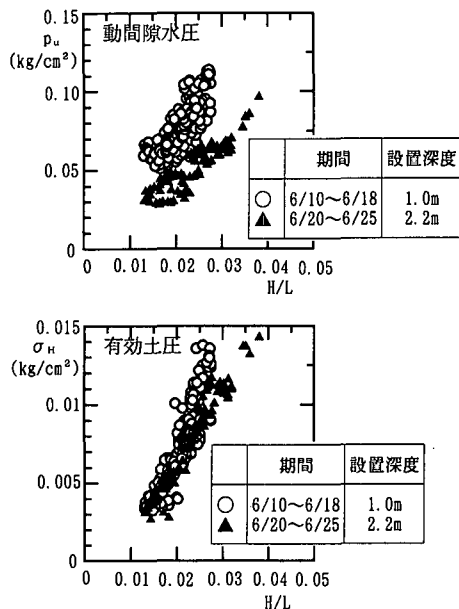


図-7 有義応答値と波形勾配

である。図-8に260m地点の各種データ平均値について示す。水圧の平均値は潮位をほぼ示している。波が比較的小さく低潮位の時に動間隙水圧の平均値が上がり、有効土圧の平均値が下がる傾向が見られる。有効土圧の有義応答値の変動オーダーに対し、平均値の変動オーダーは、1オーダー大きい。この平均値の変動オーダー0.1 kg/cm²を後述する検定値を使用して地形変化量に換算すると2.9mとなり現実的ではない。

図-8を見なおすと、動間隙水圧と有効土圧の両者の変動は、和を取ると変動がほぼ相殺される傾向が確認できる。よって、本来の砂層土被り厚さの変動を示す有効土圧の平均値に大きな変動が生じる理由としては、何らかの原因で生じた動間隙水圧の平均的な上昇が有効土圧の出力に影響を及ぼしたものと考えられる。

そこで、動間隙水圧の上昇理由について検討を行った。動間隙水圧の上昇が1日周期でほぼ低潮位時に大きくなることから低潮位時に水深が浅くなることによる水面波形の非線形性の増大や長周期波成分の増大等が、応力の蓄積が起こした原因と考え検討を行った。水面波形の非線形性については、歪度・尖鋭度を求め、長周期波成分については、加藤ら(1993)のスペクトルによる分離法を使用して周期30秒以上の波高および周期を求めた。図-9の結果より、動間隙水圧の平均値の時間変動に対する非線形性や長周期波成分の変動の相関は小さく影響が少ないことが確認された。結局、原因については特定はできなかったが、その他の影響として、①浮遊砂濃度の増大(低潮位時の波高の増大に伴う浮遊砂濃度の上昇

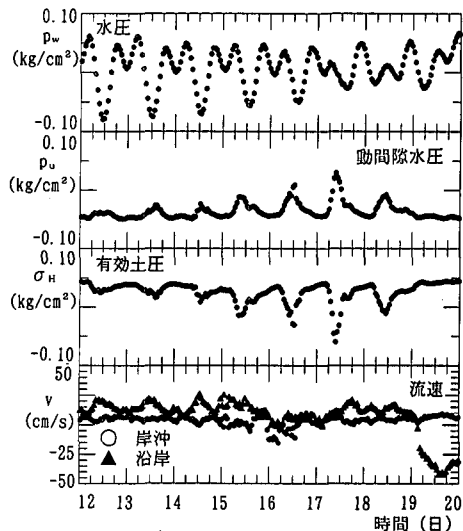


図-8 平均値の時間変化

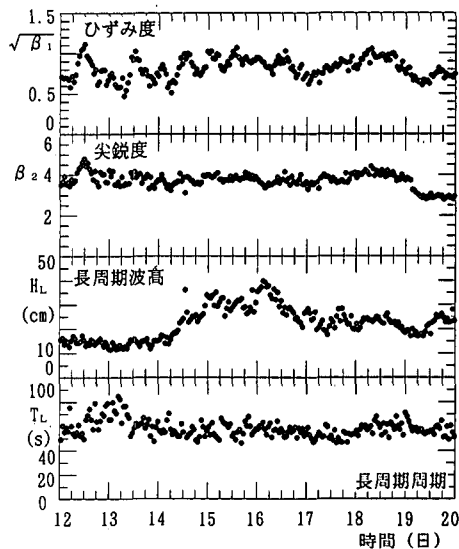


図-9 入射波の非線形性と長周期波

が海水の見かけの密度を上昇させる効果), ②浸透流(縦断地形全体の地下水位分布もしくはバード付近傍の地形効果により生じる浸透流の効果), ③沿岸流や岸沖方向の戻り流れ等の定常流速(波による水圧変動以外で地形変化を生じさせる機構), ④波群(前節の時系列波形で示した波群の効果)等が考えられ, これらの複数の要因が重なりあって, 動間隙水圧の平均値の変動が生じたものと考えられる。ただし, ③については, 図-8の最下段の平均流速の結果より動間隙水圧の変動に対して相関がなく余り影響がないものと考えられる。

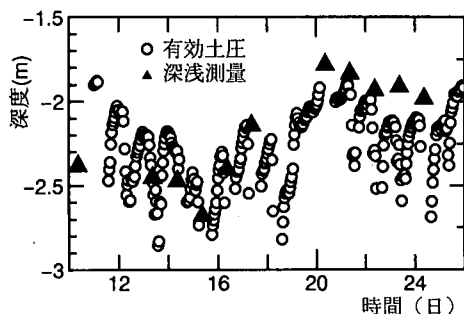


図-10 有効土圧から求めた地形変化

3.5 有効土圧と地形変化

有効土圧の平均値 σ_H より土被り厚さの変化 Δh の評価は次式により行った。

$$\Delta h = \sigma_H / K_0 / ((1-n)(\rho_s - \rho_w)g)$$

ここに、 K_0 は静止土圧係数、 n は間隙率、 ρ_s 、 ρ_w はそれぞれ土粒子と海水の密度で、それぞれ 2647 kg/m^3 、 1030 kg/m^3 とした。 K_0 、 n は前野ら (1993, 1994) が実施した室内実験により得られた 0.412 と 0.482 を使用した。

前節で示したように、有効土圧の平均値の大きな変動は、動間隙水圧の上昇により生じたもので、出力値のすべてが地形変化を示すものではないと考え、大きな変動が生じた時間帯のデータを除いて上式を使用して地形変化の計算を行った。有効土圧平均値から求めた地形変化と深浅測量の地形変化の比較を図-10 に示す。

有効土圧が大きく変動するデータを除去して処理を行ったが、有効土圧が急激に増加・減少する部分については深浅測量による結果と一致していない。しかし、それ以外の部分については、測定位置が沿岸方向に異なる点等を考慮すれば（深浅測量は棧橋断面の端の位置、有効土圧は棧橋断面の中央位置）、深浅測量による地形変化の傾向を大まかにではあるがとらえており、さらなる検討や改良は必要であるが、有効土圧計を地形変化の連続計測を目的とする機器として使用することが期待できるものである。

4. おわりに

今回の砕波帯内における砂層内応力の現地観測により、次のことが明らかになった。

1) 砂層内部の応力状態の計測により、砂層表面の状態を把握することができ今回提案した計測方法の妥当性を確認した。

2) 砕波帯外で生じる水面波形と間隙水圧の位相差は、砕波帯内では余り顕著に生じないことを確認した。

3) 間隙水圧および有効土圧変動とも、周期が比較的短い波形勾配の大きな風波性の波が作用した時に変動が大きくなる傾向が確認された。

4) 長時間連続測定により、日単位の周期で動間隙水圧が増加、有効土圧が減少する現象が確認された。

5) 有効土圧の平均値より求めた地形変化量と深浅測量により得られる結果が概ね一致することを確認した。

謝辞： 現地観測に際し、運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設の棧橋およびその付属施設を使用させて頂いたことを記すとともに、各種のデータを提供して頂いた港湾技術研究所漂砂研究室の関係各位に深謝の意を表します。また、計測に協力して頂いた(有)中央工測、三国屋サルベージに深謝の意を表します。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良 (1989): 荒天時のバーム地形の侵食、長周期波に注目した現地観測, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 354-358.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1987): 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—, 港湾技術研究所報告, 第 28 巻第 3 号, pp. 29-57.
- 鶴谷広一・椎住智明 (1990): 砕波帯内における底質の流動化と浮遊について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 289-293.
- 前野賢彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一 (1993): 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 576-580.
- 前野賢彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一 (1994): 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測 [動間隙水圧および有効土圧計の開発とその利用], 共和技報, No. 433, pp. 3265-3270.