

海域締切り工事における流れの数値解析と施工検討

Investigation into construction process at the works bulkhead based on numerical flow analysis

平岡順次*・澄川 健**・中下明文***

Jyunji Hiraoka, Tuyoshi Sumikawa, Akifumi Nakasita
田坂友次郎****・北崎義隆****・永瀬恭一*****
Tomojiro Tasaka, Yoshitaka Kitazaki, Kyoichi Nagase

In harbor entrances, a rapid currents sometimes happen with large-scale vortex by tidal waves and harbor oscillation. As the harbor entrance narrow down with construction works, the same current is expected. From the point of view, an investigation was necessary to ensure safe works, at the works of bulkhead for ash disposal in the Misumi thermal power plant.

In the beginning, we observed water velocities and surface variations for the investigation and the analysis. As a result, we can get surface variations due to 13 minutes period waves. We thought that these waves caused the rapid current. Then, we calculated water velocities at every step of works by method of shallow water equation, and evaluated the process of construction.

Key words : harbor oscillation , bulkhead , shallow water equation , construction.

1. はじめに

港湾の入口では、潮汐や湾水振動等によって、しばしば大規模な渦を伴う速い流れの発生することが知られており（例えば、中山ほか（1994））、港湾工事などの施工過程においても港口が狭くなるにしたがって同様の流れが発生することが予測される。中国電力三隅火力発電所の灰捨場護岸工事においても、最終締切り箇所では5ノット程度の流速が観測され、締切り工事の安全性が問題となった。

そこで、施工前の流況や水位の変化を観測し、施工検討や解析に利用

するデータの取得を試みた。その結果、流れと同時にその原因と推測される13分程度の長周期水面変動を観測することができた。この水面変動のデータを用いて数値解析を行い、各施工段階の流速を予測して施工方法の検討を行った。また、施工に際して再び現地観測を行い、解析値との比較を行った。

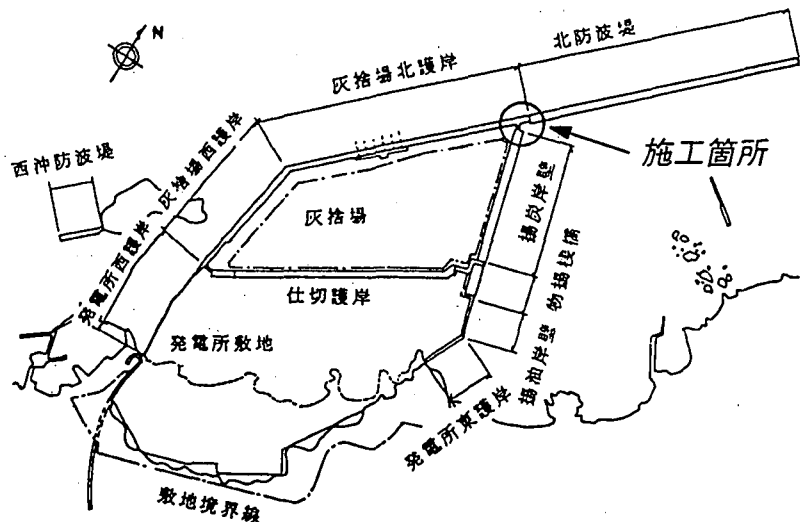


図-1 三隅火力発電所全景

2. 工事概要と問題点

三隅火力発電所は、島根県西部の日本海に面して立地する石炭専焼火力発電所（1号機：100万kW、2号機：40万kW）である。発電所用地の造成工事は昭和61年10月に着手しており、平成10年7月に1号機の営業運転を開始する予定である。運転に伴って発生する石炭灰は、発電所敷地に隣接した海域の管理型灰捨場に処分する計画で、その面積は約32万㎡を有する。当工事は、図-1に示すような灰捨場を最終的に外海と隔離する締切り工事である。図-2に示すように、ケーソン4基（No.96～99）、ケーソンと鋼板セルを連結するアーク2枚を据付ける。既設ケーソンと当工事によって据付けるケーソンとの接合部は、水中コンクリート工によって海域の締

* 正会員 中国電力(株) 三隅発電所建設所 土木課 課長（現、中国電力(株) 土木部 課長代理）

** 正会員 中国電力(株) 三隅発電所建設所 土木建築課 副長

*** 正会員 中国電力(株) 三隅発電所建設所 土木建築課 係長

**** 正会員 (株)フジタ 広島支店 土木部

***** 正会員 (株)フジタ 技術研究所 土木研究部（〒224 神奈川県横浜市都筑区大圃町74）

切りを行う。

ケーソン据付け工事に先立つ捨石基礎の造成中に、工事箇所を横断する速い流れが発生して潜水作業が不可能となり、度々工事の中断を余儀なくされた。ケーソン設置などの工事の進捗に伴って、開口部が縮小によって流速の増加が予測され、工事の安全性と施工性が問題となった。

3. 現地観測

施工検討を行うに当たり、現地観測を行った。まず、周辺の水位の時間変化と流速の関係を調べることを目的とした短期観測（平成7年6月15日16:00～16日24:00）を行った。その後、速い流れの発生頻度を調べ、波浪や気象条件との関係を検討するため、約2週間の長期観測（平成7年6月17日～7月3日）を行った。水位は既設のケーソンに容量式波高計を固定して観測した。また、流速は鋼管杭および既設ケーソンに固定した電磁流速計とメモリバック式流速計を用いて観測した。なお、長期観測は短期の観測が終了した時点でST1の流速計の設定を変更して行った。観測位置および観測内容は図-2と表-1に示す。

3.1 短期観測結果

短期観測を行った32時間の観測期間の内、流速と水位が周期的に変動した1995年6月16日18:00～20:00のデータを図-3に示す。水位変動は0.5秒、流速は1秒間隔で観測しており、各々30秒間のデータを平均して、風波など影響を除去した。

図-3(a)のH1は締切りの内側水位、H2は外側の水位である。同図からこの時間帯は潮汐によって水位が平均水面より下がり始めた段階であることが分かる。潮汐による水位の低下とともに、約13分の周期で10cm程度の振幅が見られる。この振幅が、問題となっている流れの大きな原因と考えられる。

灰捨て場内の平均的な水深 h を10mとすると、波長が水深に比べ十分長い浅水長波の波速 C は $C = \sqrt{gh} = 9.9 \text{ m/s}$ となる。灰捨て場の形状を長方形（長辺方向の奥行き $L \approx 1,200 \text{ m}$ ）と仮定して、固有周期 T を概算すると $T = 2L/C = 240 \text{ 秒}$ となる。しかし、観測された水面変動はその3倍以上の周期を持つ。したがって、流れの原因は灰捨て場内の固有振動による水面変動ではなく、もう少し広い海域の固有振動による水位変動などが原因と考えられる。

次に図-3(b)～(d)の流速に注目する。ST1は水面下5m、ST2は水面下2mの同一鋼管杭

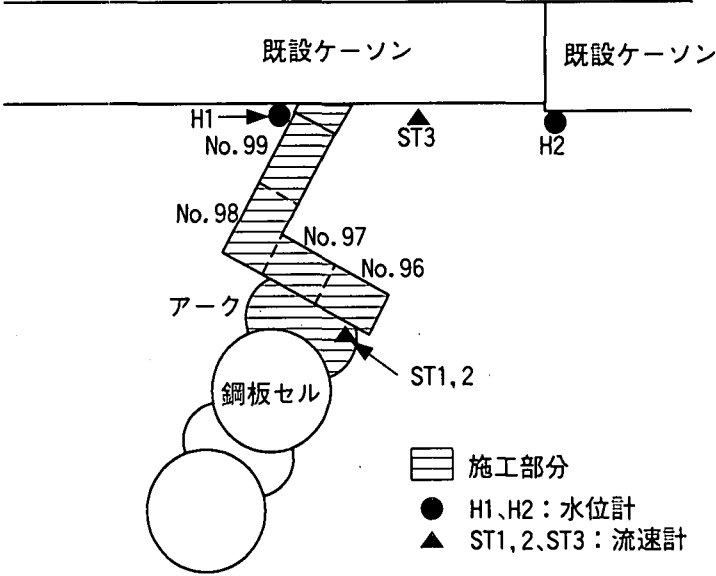


図-2 工事箇所詳細

表-1 観測機器

観測項目	期間	測点	設置水深	計測器	サンプリング間隔
水位	短期	H 1		容量式波高計	0.5sec
		H 2		容量式波高計	0.5sec
流速	長/短期	S T 1	-5m	メモリバック式	5min./1.0sec
	短期	S T 2	-2m	電磁流速計	1.0sec
		S T 3	-2m	電磁流速計	1.0sec

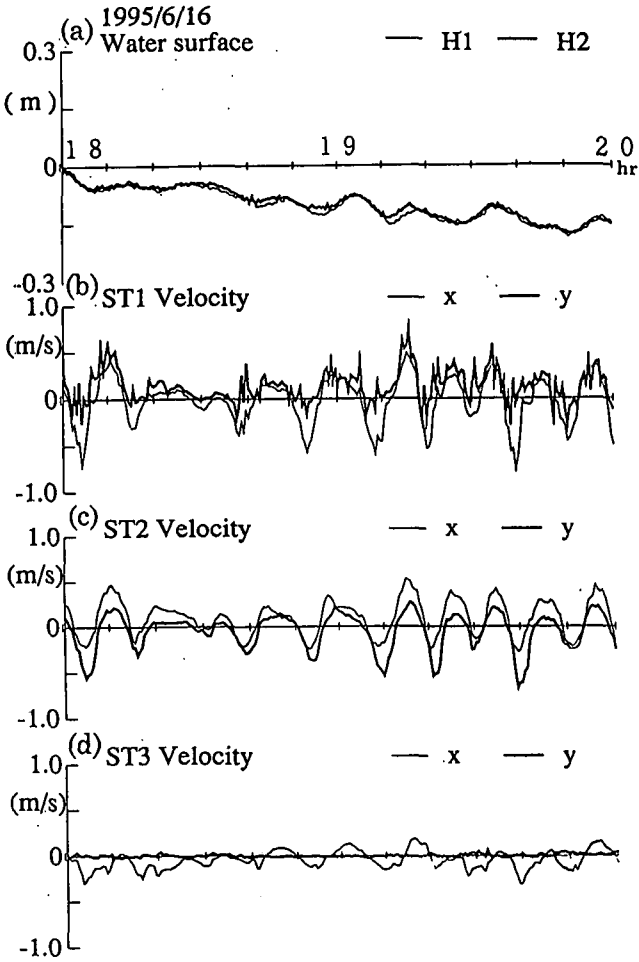


図-3 短期観測結果

に設置して2層の流れを観測している。また、ST3は北護岸の前面1mの地点に設置されている。図-3(b),(c)よれば、水面変動と同周期で0.5m/s程度の流速が観測されている。流速計を鋼管杭に金物で固定しているため、流速が速くなると鋼管杭による渦が発生して流速に乱れがみられる。ST2の流速に比較してST1の流速の乱れが大きいのは、電磁流速計の時定数の違いによるものと考えられる。この2点の流速の時間

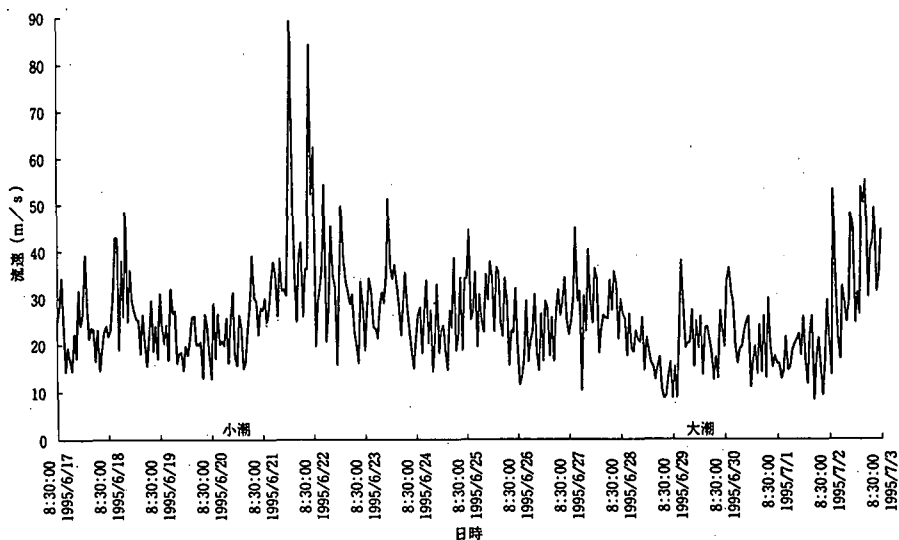


図-4 長期観測結果

変化はほとんど同じ位相で推移しており、その大きさはほぼ一致している。一方、図-3(d)に示すST3の流速に注目すれば、ST1、ST2と比較すると振幅は小さいが、同じ位相で時間変化していることがわかる。

3.2 長期観測結果

16日間の観測期間中、ST1の流速計で5分毎に1分間の観測を行った。その絶対値を一時間ごとに平均して図-4にプロットした。平均的に0.25m/s程度の流れが続いており、時折なにかの原因によって流速が速くなる時があることがわかる。ケーソン設置などの作業を行うにあたって、この0.25m/s程度の流速は避けることができず、それ以上の流速が発生する場合には海象の変化に十分注意をして施工を進める必要があると思われる。また、この観測期間中6月20日に小潮、29日に大潮を観測しているが、この時にも特に大きな変化は観測されておらず、潮汐と流速との明確な相関は認められない。また、同期間に周辺で別に観測された波浪のデータによると、波高・周期ともに安定しており、波浪との相関も見られない。したがって、短期観測により把握された周期約13分の水面変動が、速い流れの原因と考えられる。

4. 流れの数値解析と施工検討

4.1 検討モデル

施工計画で提案された施工順序を図-5に示す。数値解析はケーソン据付け前の状況と、図-5の①、②、③、⑤の場合について数値解析を行った。実際にはこのほか、ケーソンならびにアークの施工順序を変えた、数ケースの施工順序についても解析を行ったが、ここでは紙面の都合で省略する。

4.2 数値解析方法

圧力を静水圧分布としコリオリ力を無視すると、長周期の水面変動による流れの連続式と運動方程式は、以下のとおりに表される。

$$\text{連続式: } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \eta)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \eta)V] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{運動方程式: } \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{gn^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \eta)^{7/3}} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{(h + \eta)^{7/3}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 h :水深、 η :平均水位、 U, V : x, y 方向の水深平均流速、 g :重力加速度、 A_h :水平方向の渦動粘性係数、 n :マンシングの粗度係数である。渦動粘性係数と粗度係数に関しては、田中・和田(1985)などを参考に数ケースの試計算を行い、 $A_h = 5.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 n は捨石上を0.03としてその他の海域については0.01を用いた。また、壁面の条件はスリップとした。

現地観測によれば、締切り工事で問題となっている流れは、13分程度の長周期の水面変動が原因と考えられる。そこで、この水面変動を入力とし、以下のような手順で各施工段階における流速を計算した。

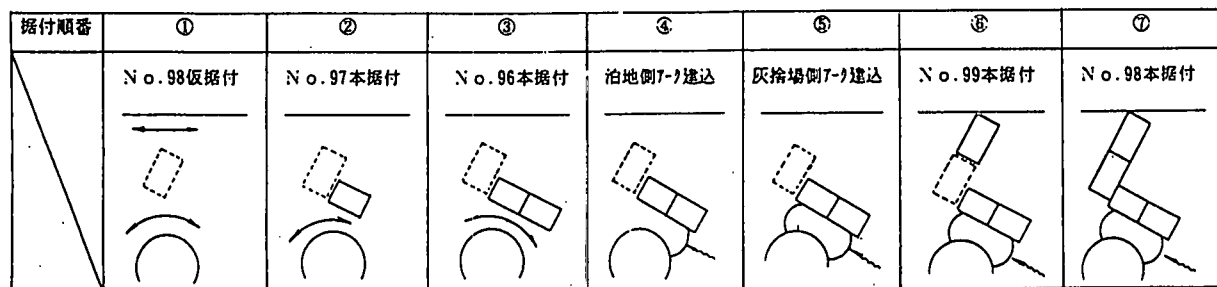


図-5 施工順序

- (i) 灰捨場全域を対象とする解析領域 (大領域: $1,450\text{m} \times 450\text{m}$ 、 $\Delta x = \Delta y = 5.0\text{m}$) の締切り外側の境界条件に、周期 13 分、振幅 0.1m の正弦波を水面変動として与え解析を行う。なお、水面変動を与える境界は施工箇所から約 250m 東側とした。
- (ii) 格子間隔を小さくした施工箇所付近の領域 (小領域: $80\text{m} \times 80\text{m}$ 、 $\Delta x = \Delta y = 1.0\text{m}$) について数値解析を行う。境界条件は、(i) の計算で得られた水位変化とする。
- (iii) 施工検討を行うために、必要な各地点の流速の時間変化と流速の平面的な分布などを出力する。

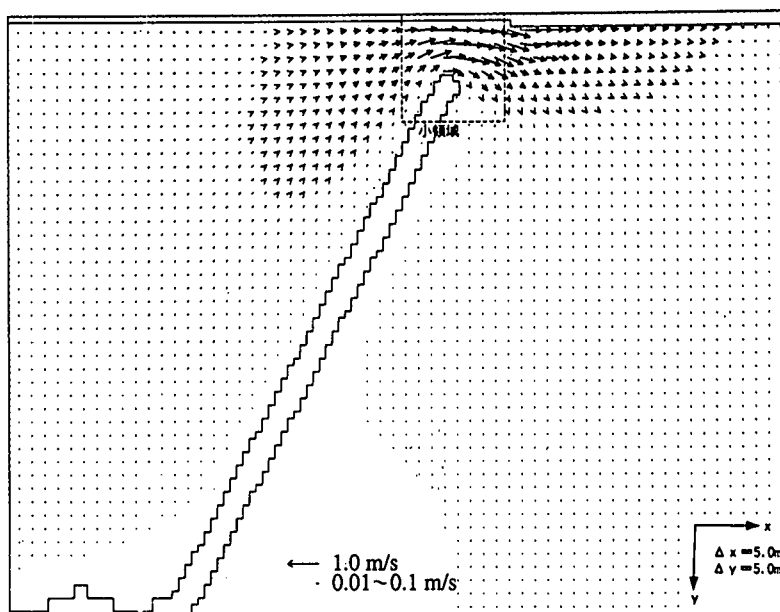


図-6 大領域流速分布 (施工前)

4.3 解析結果

図-6 にケーソン据付け前の、大領域の流速分布の一例を示す。図示したのは、締切り内から外への流れが最も速い時刻のものである。北護岸と北防波堤にそって流出するものが卓越しているが、南側へも流出していることが分かる。また、締切りの内部全体から狭窄部に集中した流れが、時計方向に回り込むように流出して、拡散しているようすが分かる。

ケーソン据付け箇所には捨石基礎が既に設置されており、天端水深は 8 m と最も浅くなっている。このマウンド部分で、開口幅の縮小と水深の低下によって流れが早くなり、摩擦損失等の増大をもたらすとともに、両海域の海水交換が支配されている。図-6 に破線で示した小領域の計算結果を図-7 に示す。小領域の境界に大領域で計算された水位を与えたが、内外で流速分布がうまく接続されていることが分かる。狭窄部を通過した流れは、北護岸に沿いに進んだ後に広範囲に広がるように流出している。

次に、図-7 で示した P1~P4 の地点での水面変動と流速の時間変化を図-8 に示す。同図(a)の水面変動に注目すると、小領域の外側にあたる P4 はノコギリ型の波形をしており、締切り内の P3 はほとんど変化を示していない。この 2 点の水位差によって P1、P2 の流れ

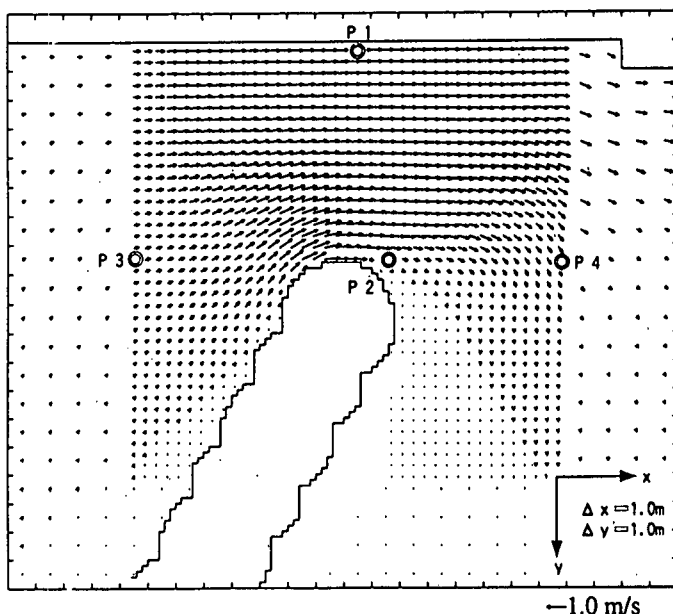


図-7 小領域流速分布 (施工前)

表-2 施工ステップ毎の予測流速

	施工ステップ				
	施工前	①	②	③	⑤
P1 流速 (m/s)	0.83	0.71	0.81	0.89	0.67
P2 流速 (m/s)	0.86	0.31	0.20	0.17	

が発生している。同図(b)に示す北護岸の前面のP1では北護岸に沿ったx方向に約0.83m/sの流速が予測される。図-7の流速ベクトルでも明らかなように、P1、P2では、北護岸に沿った方向の流れが卓越しており、Y軸方向の流れはあまり発生しない。P1ではX方向の流速が正弦波のような変化を示しているが、図-8(c)に示すようにP2では締切り内から外への流速が卓越している。

次に、ケーソンを2基据付けた場合(図-5の施工ステップ②)の小領域での解析による流速ベクトルを図-9に示す。狭窄部の中央を約半分遮る2基のケーソンによって、流れが分断されていることが分かる。その結果、北護岸に沿った流れはあまり変化しないが、P2側ではその流速が小さくなることが分かる。

4.4 施工検討

以上のような方法によって、施工ステップごとの解析を行い、それぞれの流速を整理したのが表-2である。当初、ケーソンの設置が進むにしたがって開口部が小さくなるため、流速が増すのではないかと想定したが、北護岸側のP1については目立った変動はないことが分かった。一方、P2側は施工ステップ①でケーソン No.98 を設置した時から流速が減少することが分かった。これは、鋼板セルとNo.96,97ケーソンの間が約6mと北護岸側の開口部に比べて狭いことや、図-6、図-7などに示すように、北護岸に沿った流れが卓越していることなどによるものであると考えられる。

以上の解析結果から、施工時の流速は施工前に比べてあまり大きく増加しないと考えて、図-5に示した順序で施工することに決定した。

5. 施工時の流速

施工に際して再び現地観測を行った。図-10に観測装置の配置を示す。水位観測位置を図-2に示した位置と変更したのは、クレーン船による作業の障害になるためである。

図-5の施工ステップ①に相当するNo.98ケーソンを仮据付け後の観測結果を図-11に示す。

水面変動と同時に最大で1.0m/s程度の流速が発生していることが分かる。また、この間の波形のピーク値を平均すると0.8m/s程度となってる。この時点での数値解析による予測値は表-2に示すように0.71m/sであり、海象の不規則性を考えると妥当な結果といえる。また、ケーソンNo.96,97を施工中とその前後は観測を行ったものの、海象が非常に穏やかで、ほとんど流れは発生しなかった。同様に、他の施工ステップの施工時の流速も観測したが、施工の障害にならない時間に観測を行ったこと、工事の進捗が早く十分な観測時間が確保できなかったことや欠測が多かったことなどにより、解析結果を検証するために十分なデータを収集できなかった。

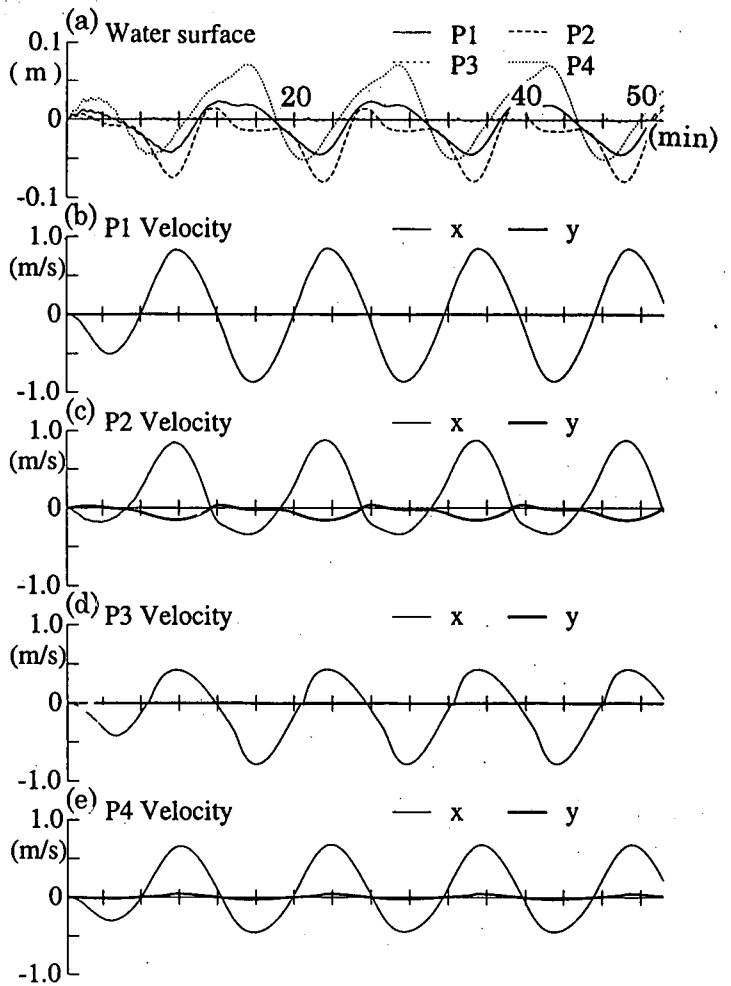


図-8 水面変動・流速の時間変化(施工前)

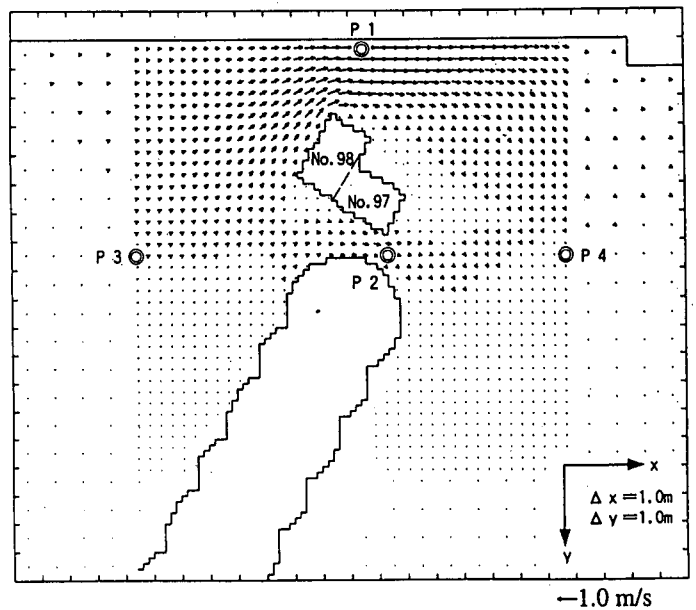


図-9 小領域の流速分布(ステップ②)

発生していることが分かる。また、この間の波形のピーク値を平均すると0.8m/s程度となってる。この時点での数値解析による予測値は表-2に示すように0.71m/sであり、海象の不規則性を考えると妥当な結果といえる。また、ケーソンNo.96,97を施工中とその前後は観測を行ったものの、海象が非常に穏やかで、ほとんど流れは発生しなかった。同様に、他の施工ステップの施工時の流速も観測したが、施工の障害にならない時間に観測を行ったこと、工事の進捗が早く十分な観測時間が確保できなかったことや欠測が多かったことなどにより、解析結果を検証するために十分なデータを収集できなかった。

6. おわりに

ケーソンの設置による海域の流れの変化について現地観測と数値解析を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 現地観測から、灰捨場東護岸と北護岸の最終締切り部分で、最大 1.0m/s 程度の流速が観測された。この時、周期約 13 分、振幅 10cm 程度の長周期の水面変動が発生している。
- (2) ケーソンの設置順序にしたがって数値解析を行ったところ、ケーソンの設置に伴って流速がやや上昇する場合があるものの、施工前を大きく上回るような流速が発生することはないと予測された。
- (3) ケーソン設置に際して、再び現地観測を行った。その結果、ケーソン 1 函を仮据付け後の状況において解析値とほぼ等しい流速が観測された。しかし、施工の進捗が早く観測期間が短かったことや、海象の不規則性などから予測していたような水面変動をとらえることができず、その他の施工ステップにおいては解析精度の十分な検証ができるようなデータを取得することは残念ながらできなかった。
- (4) 湾口など長周期の水面変動によって流れが発生する海域において、浅水長波の数値解析が工事施工時の流速検討などに役立つことが分かった。

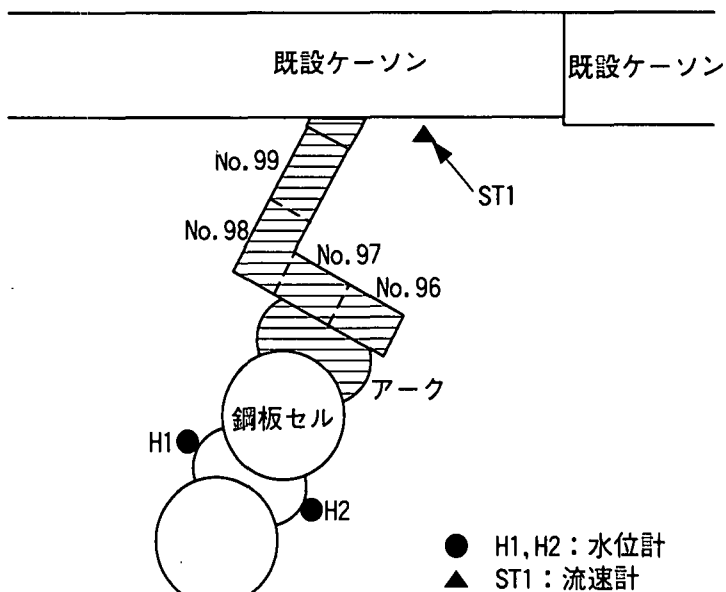


図-10 施工時観測装置位置

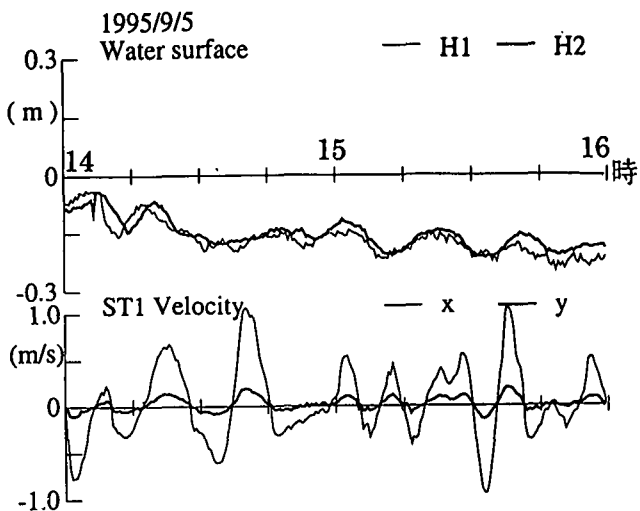


図-11 施工時観測結果

参考文献

- 中山哲蔵・山本 潤・松岡道男・池田正徳・竹内聖一・灘岡和夫・八木 宏(1994): 中小港湾湾口部に発生する水平大規模渦についての現地観測、海岸工学論文集、第 41 巻、pp.321-325.
- 田中寛好・和田 明(1985): 温排水拡散範囲に及ぼす海浜流の影響、電力中央研究所報告、研究報告 384046、55p.