

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1130

June 2006

砂礫層内における長周期の
水流動に関する現地観測

平 石 哲 也
奥 野 光 洋
安 藤 興 太

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 現地観測の内容	4
2.1 観測方法と測定内容	4
2.2 計測期間中の気象条件と波の整理	5
2.3 砂礫層透水層の特性	7
3. 現地観測の結果	8
3.1 現地の流速および水位の特性	8
3.2 砂礫層内のエネルギー損失の検討	14
3.3 現地観測結果による反射率の算定	22
4. 数値計算による反射率の算定例	23
4.1 数値計算法の内容	23
4.2 数値計算の結果	23
5. あとがき	27
謝辞	27
参考文献	27
記号表	28

Field Observation of Long Period Flow Motion in Rubble-type Sea Wall

Tetsuya HIRAISHI*
Mitsuhiro OKUNO**
Kota ANDO***

Synopsis

Interruption of cargo handling is often induced by the resonance between a mooring system and long period waves in some large harbors facing to oceans. A new type seawall with a wide permeable rubble layer is proposed to reduce the reflection of long period waves and to prevent the cargo handling damages. A detail study on the mechanism of long period flow motion inside the permeable rubble layer is necessary to design the seawall with less reflection rate of the long period waves. Only experimental and analytical studies are done so far on the mechanism of water flow inside the permeable rubble layer. In this paper, a field test was conducted on the variation of water surface and flow velocity inside a permeable rubble layer in a newly constructed seawall at "Mabori" coast, Yokosuka, Japan. The stormy and long period waves have been completely dissipated by the water penetration into the rubble layer of the sea wall. The observed results demonstrate that the change of wave energy derived from the wave height and flow velocity inside the rubble layer is approximately represented in the *Dupuit-Forchheimer* law.

Key Words: Long period wave, Sea wall, Permeable layer, Field observation, MARS model

* Head, Wave Division, Maritime and Hydraulic Engineering Department

** Member, Wave Division, Maritime and Hydraulic Engineering Department

*** Visiting Engineer, Wave Division, Maritime and Hydraulic Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445042 Fax : +81-46-8413888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

砂礫層内における長周期の水流動に関する現地観測

平石 哲也*
奥野 光洋**
安藤 興太***

要 旨

船舶の大型化により係留船舶が港内の長周期波と共振して、水平方向に大きく動き、荷役が中断される事故が最近、鹿島港、高知港などの外洋に面した大型港湾で増加している。港内の長周期波の一つとして、港内岸壁や護岸の一部を改良して、幅の広い砂礫層に長周期波を透過させ、反射による港内での増幅を抑止する長周期波対策施設が提案されている。透水層内の水流動の特性とエネルギーの消波特性については、実験式は提案されているが、現地で観測した例はほとんどない。そこで、目的は高潮対策であるが、長周期波対策施設で活用できる海岸線に直角方向に幅の広い砂礫層を有する横須賀市の馬堀海岸護岸をモデルとして、現地砂礫層内の水流動を調べた。その結果、透水層内の波高と流速から導かれたエネルギーが、*Dupuit-Forchheimer*則に類似した近似式に従って減少していくことが確認できた。

キーワード：長周期波，長周期波対策護岸，透水砂礫層，現地観測，直接流体解析法(MARS法)

* 海洋・水工部波浪研究室長，博士（工学）

** 海洋・水工部波浪研究室

*** 海洋・水工部波浪研究室研修生

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hiraisi@pari.go.jp

1. まえがき

外洋から港湾に進入する周期数十秒～数分程度の長周期波によって、係留された大型船の動揺が大きくなり、荷役障害に至る現象が、各地の港湾で発生している。(平石ら, 1996, Hiraishi et al, 2003). 荷役障害の原因は、弾性のあるロープで係留された数千～数万 DWT クラスの大型船のサージング運動が、長周期波との共振によって励起されることで、港湾の経済性と安全性を確保するためには、その対策が緊急に必要である。

長周期波による荷役障害対策として、

- 1) 防波堤の延伸や波除堤の新設による港内へ侵入する長周期波エネルギーを低減させる(平石ら, 2001).
- 2) 港内に遊水池等を設置して増幅特性を変化させる(平石ら, 1997).
- 3) 係留索の材質を改善し、共振を防ぐ(白石ら, 1995).
- 4) 長周期波の発生を予測して荷役時間を調整する(平石ら, 1997).

等がこれまでに提案されている。これらの対策法の詳細については、2004年4月に財団法人沿岸開発技術研究センターより“港内長周期波対策マニュアル”が刊行された。沖合防波堤の整備には多大な建設コストが必要で早急な対応が困難である場合が多いため、港内での人工海浜やレキ浜等の消波施設の整備による港内での長周期波増幅の低減が比較的低コストで実現できる。

平石ら(2002)は、荷役に使用されている岸壁・護岸等の既存施設を改良して、港内における長周期波の増幅を低下させる長周期波対策護岸を提案した。これは、港湾で多用されているスリットケーソンタイプの直立消波堤を改良し、陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのケーソンを活用し、裏込め材に大型の雑石層を採用して、50m以上の幅広い消波層を設けたものである。

ただし、上記の長周期波対策護岸は、具体的な工法が提案されておらず、現在のところ施工された例はない。また、現地において透水層の長周期波消波効果が実証されていないので、試験施工によって、その効果を確認しておく必要がある。

一方、著者のひとは横須賀市馬堀海岸の高潮対策事業の設計に関する委員会のメンバーとして、両面スリットケーソンの裏込め部に越波を浸透させ、背後地への越波を防止する親水性高潮防護施設の開発に関わってきた。この施設は1998年から実際に工事が実施され、2005年12月に裏込め部の工事が全長でほぼ終了している。この高潮対策護岸は、目的は異なるものの、長周期波対策護岸の構造と類似しており、裏込め部の砂礫層内の長周期

波流動を測定することにより、長周期波対策護岸の有効性を類推できる。現地砂礫層やマウンド内での水流動に関する現地観測は、これまでにほとんどなされておらず、石積み層の透過率を測定した富永ら(1971)の調査や、砂礫層による水質浄化作用を検討した小田ら(1994)の検討がなされているだけである。

本調査は、馬堀高潮対策護岸の工事途中区間を活用して、幅広の砂礫層内における長周期の水流動を測定し、長周期波対策護岸の反射率等を推定する数値計算法で用いられている砂礫内のエネルギー損失式を検証したものである。馬堀海岸高潮対策護岸は横須賀市の東京湾側に位置しており、外洋の長周期波が直接影響する場所に位置していない。したがって、観測された長周期流動の周期は長周期波に比べると短いので、長周期波による水流動を観測したわけではない。しかし、現地で砂礫層内の水流動を観測した例はないので、周期帯が異なっても参照できる結果が得られると考える。観測した項目は、3カ所での砂礫透水層(裏込め材)内の水平流速と水位で、連続したデータを取得した。

本資料では、まず第2章で現地観測の概要を示す。次に第3章で現地観測から導かれる砂礫層内のエネルギー損失を示す。エネルギー損失は、透水層内における波高と流速から計算した。

透水層内での長周期波のエネルギー損失を推定できるモデルとして、平石ら(2002)は、近藤ら(1983)によって紹介されている *Dupuit-Forchheimer* 則を用いてきた。そこで、本調査でも現地のエネルギー損失を *Dupuit-Forchheimer* 則で表すことを試みた。次に第4章では今後の課題として、長周期波対策護岸を製作したときに期待できる反射率を、一構造を例として考察した。

2. 現地観測の内容

2.1 観測の方法と計測内容

横須賀馬堀海岸の高潮対策護岸整備事業では、風波に対する消波効果の向上と護岸背後の遊歩道部に越波した波の地下への排水を促進するために、海側と陸側の両面にスリットを有するケーソン護岸が使用されている。図-1に馬堀海岸高潮対策護岸の標準部の模式断面を示す。小段部に続くケーソンの断面方向の長さ l と鉛直高さは、ともに5.0mである。海側(前面)スリットは幅20cmで一函あたり4本設けられている。スリットの開口総延長/ケーソン幅を開口率 δ として定義すると $\delta=0.2$ となる。ケーソンの陸側(後面)も同様な開口率0.2のスリットを有している。後面スリットの背後には直径50cm以上

の雑石を配置し、ケーソン内への滑落を防止し、随時、直径の小さい雑石を投入して背後の裏込め層を形成している。碎石層の表層は、粒径を調整して平坦にできるので一部を歩道とすることも可能である。

馬堀海岸高潮護岸のケーソン設置工事は2000年1月から始まり、2005年9月現在では、本体工事が終了し、上部工工事が進んでいる。写真-1は、2005年8月における馬堀海岸高潮護岸の建設状況である。

馬堀海岸高潮対策護岸Ⅲ-1 工区において、裏込め層内の流速・水位の現地観測を行うこととした。図-2に観測地点位置図を示す。観測地点は、馬堀海岸高潮対策護岸の東端に当たり、走水側の工事区域と通称で呼ばれている。両面スリットケーソンが施工されたばかりで、上部工の工事は成されていない。

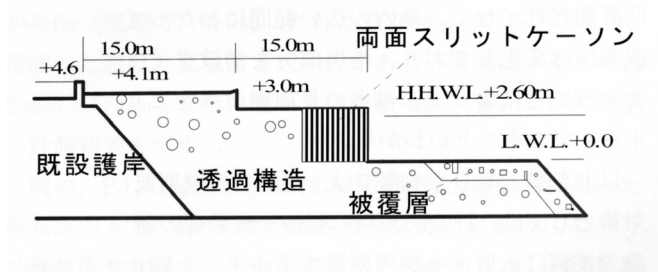


図-1 馬堀海岸高潮護岸の標準断面例



写真-1 馬堀海岸高潮護岸

計測器は、図-3に示すように、法線直角方向に3カ所の計測機器を設置し、透水層（捨石）内の流速を測定した。計測器の間隔は、スリットケーソン後面のNo.1から透水層内部のNo.2までが4.5m、No.2から透水層の奥に設置したNo.3までが9.5mである。計測期間は、2005年8月16日から9月30日までの期間中、0.5s間隔で48時間連続のデータを2回取得した。

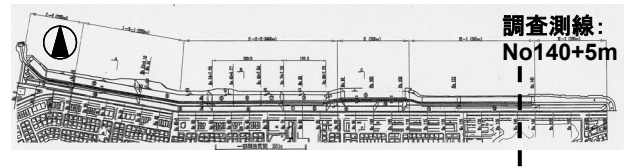
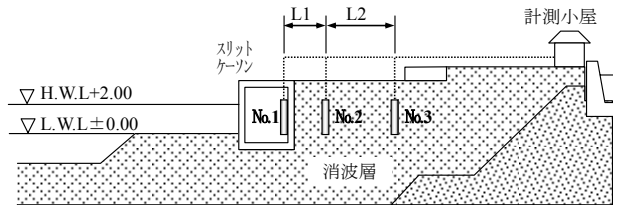


図-2 観測地点位置図



- *1) 計測機器の設置高さ ±0.00m
- *2) 計測機器間の距離 L1 = 4.5m, L2 = 9.5m

図-3 計測機器取付概要図

2.2 計測期間中の気象条件と波の整理

(1) 台風11号および台風14号

観測期間中に来襲した台風11号は、8月20日03時に父島の近海で発生し、21日21時には最大風速50m/sの「非常に強い」台風へと発達し、日本の南海上を北西に進んだ。その後24日朝からは勢力を弱めながら進路を北に変え、さらに東海道沖に進んだ25日朝からは進路を北東に変えた。26日02時半頃に三浦半島を通過し、その後26日04時半頃に千葉市付近に上陸して、千葉県内を北東に進んだ。図-4に台風11号の経路図を示す。

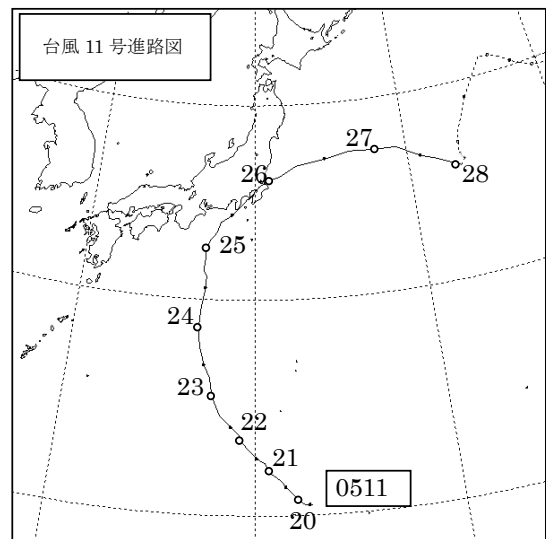


図-4 台風11号経路図

台風14号は、8月29日21時にマリアナ諸島近海で発生し、9月1日09時には「大型で非常に強い」台風となった。台風はその後北西～北北西進し、6日03時には九州の南海上で「大型で強い」台風となり、6日14時すぎに長崎県諫早市付近に上陸した。台風はその後日本海を北東に進み、北海道に再上陸した。海上では台風の接近に伴って波やうねりが高くなり、東海地方沿岸では5日から7日にかけて、北陸地方近海でも7日には6メートルを超える大しけとなった。図-5に台風14号の経路図を示す。

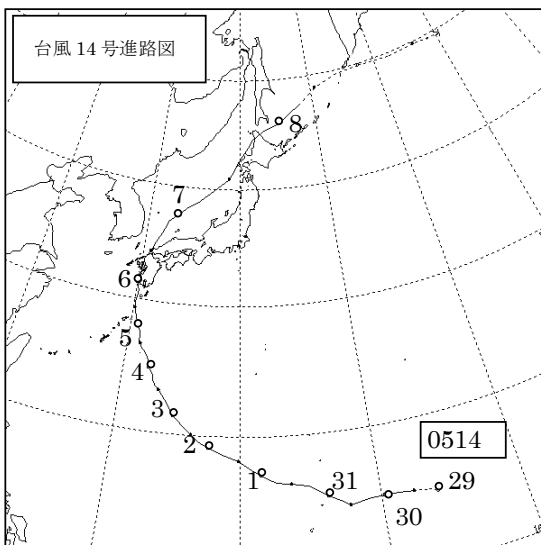


図-5 台風14号経路図

(2) 観測時における波の整理

本研究では、波高計を護岸前面に設置することが困難であったため、護岸前面波高を計測できなかった。従って、馬堀海岸における観測時の波高を推定するため、NOWPHASのアシカ島における波高観測値からエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行い、観測地点の波高を推定した。

図-6および図-7に台風11号および台風14号が来襲した期間におけるアシカ島のNOWPHAS波浪観測記録を示す。台風11号が東海道沖に近づいた8月25日12時頃からアシカ島では徐々に波高が高くなり始め、25日夜から26日明け方にかけてピークで3m弱となった後、減少した。周期については、25日から周期10秒程度のうねりが入っていたが、波高とともに減少した。台風14号が九州西部を北上、上陸した9月5日から6日には、アシカ島では波高約2m程度、周期約13～14秒であった。

これらのアシカ島観測地点におけるNOWPHAS波浪観測値を沖波諸元とし、図-8に示す領域-1においてエネ

ルギー平衡方程式による波浪変形計算を行った。なお、メッシュ間隔は50mとし、波のエネルギー集中度は風波の標準値である $S_{max}=10$ とした。第二海堡地点における8月25日から8月26日まで1時間ごとの計算結果および第二海堡地点のNOWPHAS観測値との関係を図-9に示す。両者の時系列的な傾向はよく一致し、波浪変形計算が精度よく計算されていることがわかる。計算値と観測値の相関関係を図-10に示す。第二海堡地点での計算値と観測値が一致することから、東京湾の南方から入射するうねりの変形はエネルギー平衡方程式で推定できることが分かる。

次に同一のモデルを用いて、図-8に示す領域-2において、第二海堡地点での波高を領域-2の入射条件として、馬堀海岸護岸における波高を計算した。入射波向については第二海堡地点で観測値と一致するように与えている。現地観測を行った馬堀海岸における計算結果および両面スリットケーソン内に設置したNo.1地点の水位観測結果との関係を図-11に示す。計算値と観測値の差に開きがあるのは、観測値ではスリットケーソンの消波効果により波高が減少しているためと考えられる。図-12は、馬堀海岸護岸前面の計算波高とスリット内部でのNo.1の観測波高の相関である。スリット内部の波高は、平均すると護岸前面波高の1/2.25倍になる。

観測期間中の馬堀海岸護岸前面の推定有義波高 $H_{1/3}$ 及び周期 $T_{1/3}$ は以下の通りである；

2005年8月25～26日： $H_{1/3}=0.4\sim 1.0\text{m}$

$T_{1/3}=6\sim 12\text{s}$

2005年9月5～6日： $H_{1/3}=0.4\sim 0.7\text{m}$

$T_{1/3}=10\sim 15\text{s}$

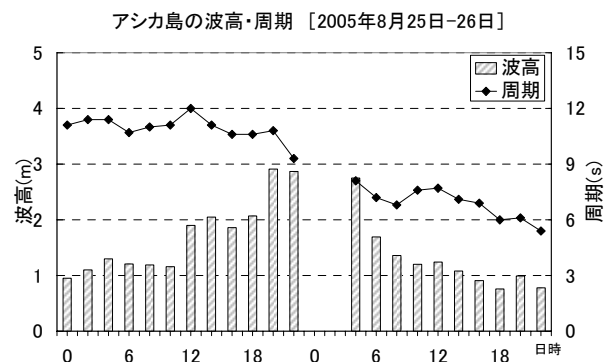


図-6 アシカ島の波高・周期 (2005年8月25日～26日)

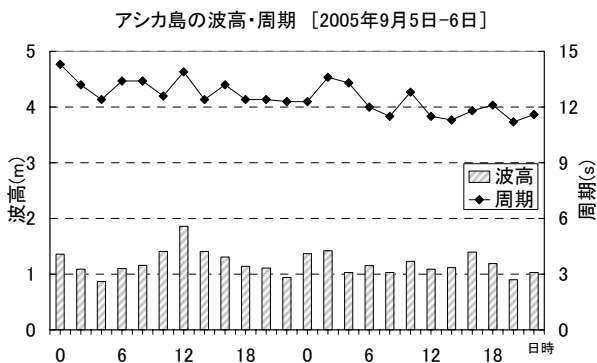


図-7 アシカ島の波高・周期 (2005年9月5日～6日)

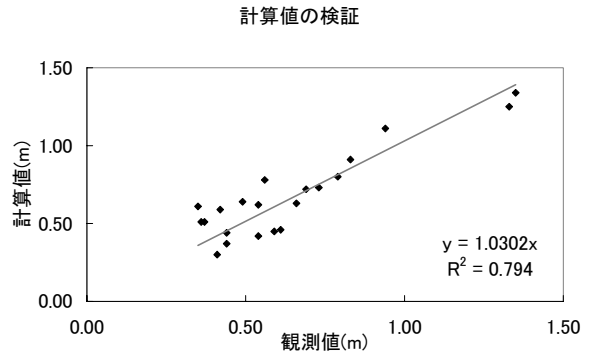
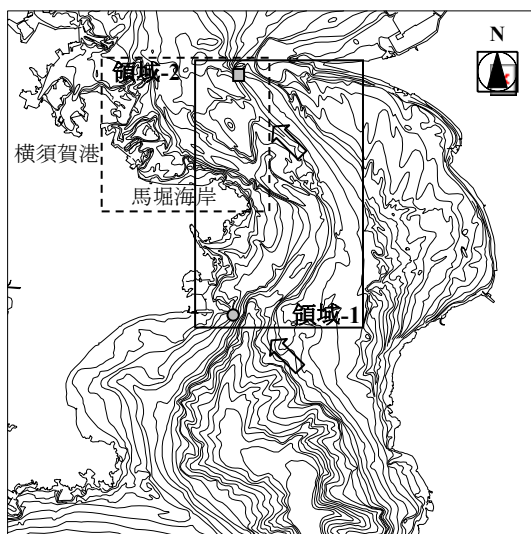


図-10 計算値とNOWPHAS観測値の相関(2005年8月25～26日)



- *1) 領域-1, 6,300m×10,000m Δx=50m
- *2) 領域-2, 7,500m×6,800m Δx=50m
- : アシカ島観測地点
- : 第二海堡観測地点

図-8 計算領域と対象地点の領域図

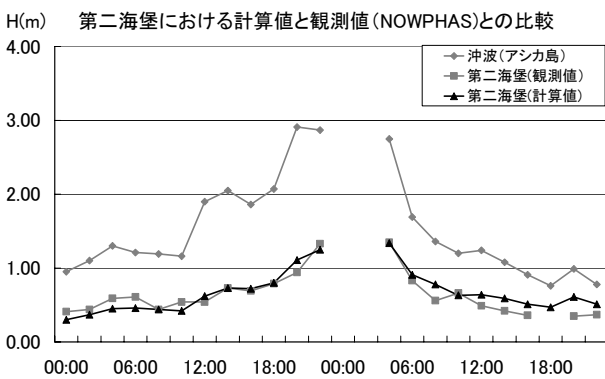


図-9 第二海堡における計算値の検証 (8月25日-26日)

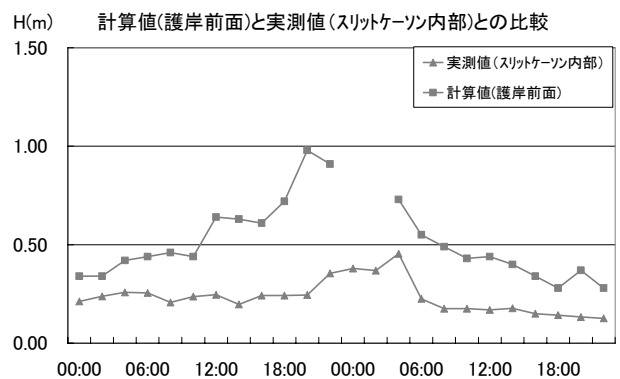


図-11 護岸前面波高計算値とスリット内の観測波高の変化 (8月25～26日)

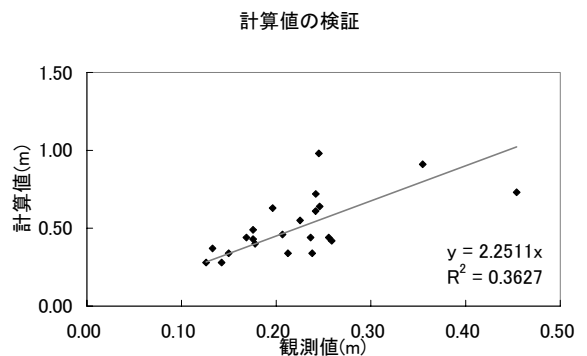


図-12 計算値と実測値の相関(2005年8月25～26日)

2.3 砂礫透水層の特性

後述の透水砂礫層内のエネルギー損失計算において、石材の特性値として空隙率および中央粒径を測定した。馬堀海岸高潮対策護岸の透水層（裏込め材）と同等の石材を用い、港湾空港技術研究所内において、フレキシブル仮設型枠（ロングライフマリンマット）を用いて石籠を製作した。仮設型枠を用いた石籠を写真-2に示す。



写真-2 フレキシブル仮設型枠を用いた石籠

室内試験により石材密度を測定し、石材密度 $\rho_s=2.56\text{t/m}^3$ が得られた。測定に用いた石材は、室内試験の用途に集められており、粒径はほぼ一定に近く、室内試験で用いた石材の体積を球で換算したときに求められる代表径は 0.31m であった。表-1 に砂礫層質量測定結果および空隙率の算出結果を示す。砂礫層の質量は、ラフタークレーンで砂礫層を吊り上げ、ロードセルを用いて、3個の砂礫層で測定した。砂礫層の体積は 6.0m^3 、籠材質量 20.0kg として、先に求めた石材密度から砂礫層の空隙率を算出した結果、平均値として空隙率 39.1% が得られた。

砂礫透水層に用いる裏込め材の充填時の空隙率は、現地で測定することが困難である。一方、現地の裏込め材として用いる採石の粒径は、現地工事区域でも測定できるが、石の表面の長軸を測定して求めるため、球に換算した代表粒径は求められない。本調査で、現地で 200 個の採石を無作為に抽出し、表面の長軸を測定して、中央粒径を求めたところ、 40cm を得た。この値は、フレキシブル仮設型枠に充填した砕石から得られた代表粒径より大きい。両者の採取場所は神奈川県真鶴町で同一であり、ほぼ同質な砕石層と考えることができる。したがって粒径の差は、割石の長軸を測定するか、体積を球に換算して球の直径として計算するかによると考えられる。

一方、仮設型枠の作成で用いた砕石層の空隙率は、実際に石を直方体に積み上げた型枠の総重量から計算しており、現地の透水性護岸での空隙率の値として採用できると思われる。第3章の現地観測結果の解析においては、粒径を用いて材料係数を計算しているが、補正係数を用いており、どちらの粒径を用いても、粒径によって補正係数が若干変化するのみである。

表-1 空隙率算出結果

項目	試料 1	試料 2	試料 3	平均
砂礫層 質量 ① (t)	9.6	9.3	9.3	9.4
砂礫層 体積 ② (m^3)	6.0	6.0	6.0	6.0
かご材 質量 ③ (kg)	20.0	20.0	20.0	20.0
石材 質量 ④= $\text{①-③}/1000$ (t)	9.58	9.24	9.26	9.36
石材 体積 ⑤= $\text{④}/\rho_s$ (m^3)	3.74	3.61	3.62	3.66
空隙率 $\lambda=(\text{②-⑤})/\text{②} \times 100$ (%)	37.6	39.8	39.7	39.1

3. 現地観測の結果

3.1 現地の流速および水位の特性

前述した計測期間のデータの中で比較的波高の高かった 2005 年 8 月 26 日 0 時と、比較的周期の長かった 2005 年 9 月 6 日 0 時を選出し後述の解析を行った。表-2～表-5 にゼロアップクロスによる統計集計表を、図-13～図-16 に水位および流速の時系列変化を示す。図-17～図-20 に水位と流速の振幅スペクトルとその振幅比を示す。波と流速の統計解析には、毎時から 00 分から次の正時までの 60 分間の連続観測値を用い、連続した観測記録を 0.5s 毎にデジタル値に変換して有義値等を求めた。スペクトル解析では、 0.01 から $0.5(1/\text{s})$ の範囲でスペクトル密度を示した。この中で、 $1/30(1/\text{s})$ すなわち 30s よりも長い周期の運動を長周期波成分とした(沿岸センター, 2004)。スペクトルの振幅比は、スペクトル密度の比を示している。

図-17 および図-18 は、水位および流速の測定値をスペクトル解析した結果で、周期 $10\sim 12\text{s}$ の長周期側と周期 5s の短周期側にピークが現れている。長周期側の振動周期は、アシカ島で観測された波浪の周期に等しく、外洋からのうねりによる成分が伝播していることが分かる。短周期側は東京湾内の北からの風で発生した湾内発生波による成分と考えられる。図-19 および図-20 は、水位および観測流速スペクトルの密度比で、透水層内の No.2 および No.3 での水位スペクトルの密度は変化しておらず、水位の差は小さい。これは、本観測で用いた透水砂礫層が高潮時に越波した波を浸透させることを目的としており、長周期波対策護岸として計画されたものではなく、砂礫層の長さが十分長くないためと考えられる。また、スリット後壁での波高値が 1m 以下で小さく、透水層内の変動絶対値も小さく観測されにくいためと考える。

一方、流速スペクトル比は、No.3/No.2 で 1 以下になっており水流动のエネルギー減衰が水位に比べると顕著に現れており、エネルギーが低減していることがわかる。なお、透水層に平行な流速変動は微少であった。

表-2 波の統計値集計表 (2005年8月26日0時)

波の統計値 (ゼロアップクロス)									
	波数	Hmax	H1/10	H1/3	Hmean	Tmax	T1/10	T1/3	Tmean
波高No1	634	0.59	0.46	0.38	0.25	10.00	8.31	7.65	5.68
波高No2	457	0.30	0.22	0.19	0.13	12.50	12.40	11.38	7.87
波高No3	412	0.22	0.18	0.14	0.09	28.00	15.41	14.21	8.74
長周期No 1	43	0.16	0.14	0.13	0.09	126.00	118.25	104.57	83.71
長周期No 2	42	0.15	0.14	0.12	0.09	125.50	118.75	101.75	85.70
長周期No 3	43	0.16	0.14	0.12	0.08	124.00	116.38	105.89	83.71

単位 H(m) T(s)

表-4 流速統計値集計表 (2005年8月26日0時)

流速の統計値 (ゼロアップクロス)									
	波数	Vmax	V1/10	V1/3	Vmean	Tmax	T1/10	T1/3	Tmean
流速No1	547	122.43	98.31	81.94	53.33	11.50	9.96	8.97	6.58
流速No2	543	33.27	23.71	18.78	12.56	11.50	11.63	9.60	6.63
流速No3	401	16.42	12.58	10.82	7.33	13.00	12.43	11.95	8.98
長周期流速No 1	62	20.40	17.26	14.06	9.08	74.50	65.67	77.90	58.06
長周期流速No 2	60	7.27	6.10	4.83	3.18	93.50	72.00	74.75	60.00
長周期流速No 3	60	3.85	3.47	2.70	1.79	72.50	59.58	60.55	60.00

単位 V(cm/s) T(s)

表-3 波の統計値集計表 (2005年9月6日0時)

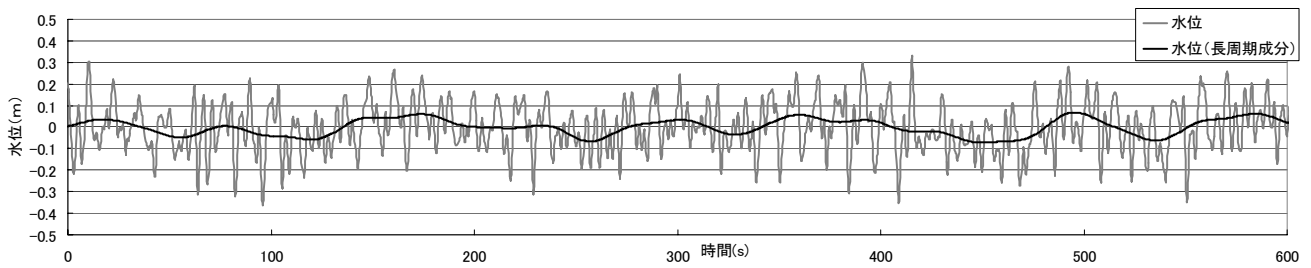
波の統計値 (ゼロアップクロス)									
	波数	Hmax	H1/10	H1/3	Hmean	Tmax	T1/10	T1/3	Tmean
波高No1	1098	0.41	0.32	0.27	0.19	6.00	3.91	3.67	3.28
波高No2	665	0.17	0.12	0.09	0.06	15.50	11.36	8.39	5.41
波高No3	486	0.14	0.11	0.08	0.05	14.50	14.00	12.49	7.41
長周期No 1	51	0.05	0.04	0.03	0.02	157.50	129.20	102.21	70.59
長周期No 2	47	0.05	0.04	0.03	0.02	156.50	136.40	108.19	76.60
長周期No 3	48	0.05	0.04	0.03	0.02	188.00	139.60	104.81	75.00

単位 H(m) T(s)

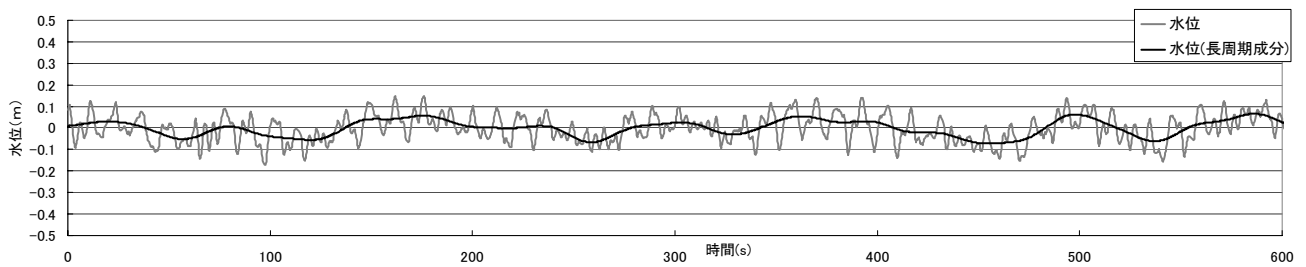
表-5 流速統計値集計表 (2005年9月6日0時)

流速の統計値 (ゼロアップクロス)									
	波数	Vmax	V1/10	V1/3	Vmean	Tmax	T1/10	T1/3	Tmean
流速No1	884	82.18	63.81	52.22	34.74	3.50	5.23	4.97	4.07
流速No2	784	20.83	13.19	10.64	7.48	12.00	9.56	6.47	4.59
流速No3	407	12.13	8.96	7.61	4.67	13.00	14.07	13.46	8.84
長周期流速No 1	65	9.47	8.33	6.31	4.13	52.50	81.50	72.32	55.38
長周期流速No 2	58	2.84	2.59	2.12	1.32	175.00	110.08	89.63	62.06
長周期流速No 3	64	1.33	1.22	0.96	0.61	66.50	73.00	72.02	56.24

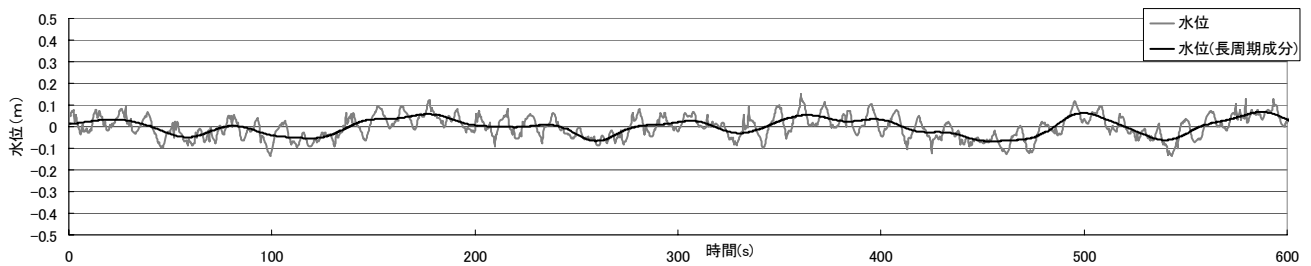
単位 V(cm/s) T(s)



(1) No.1 地点

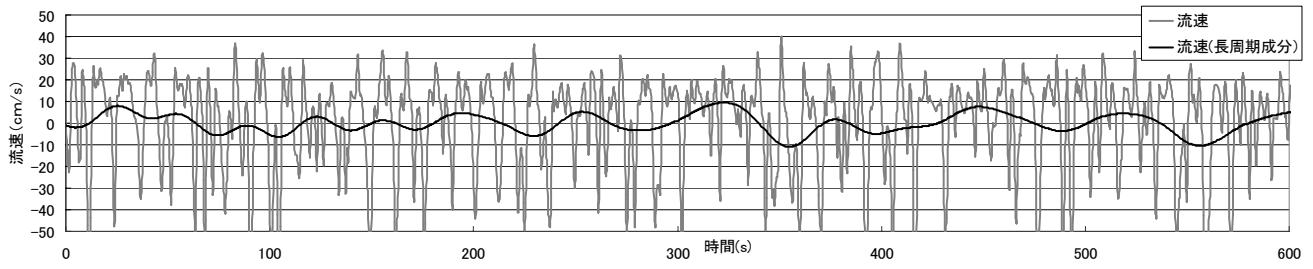


(2) No.2 地点

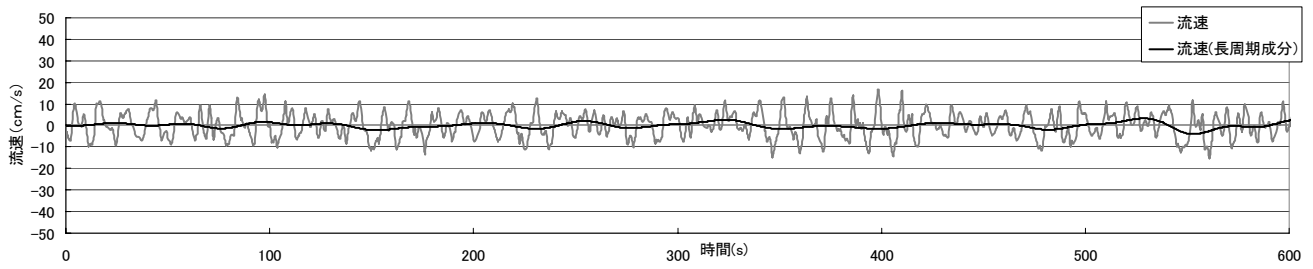


(3) No.3 地点

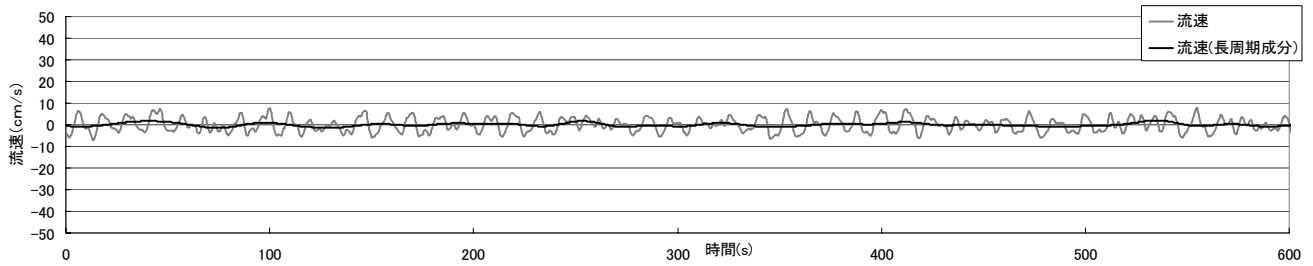
図-13 水位観測値 (2005年8月26日0時)



(1) No.1 地点

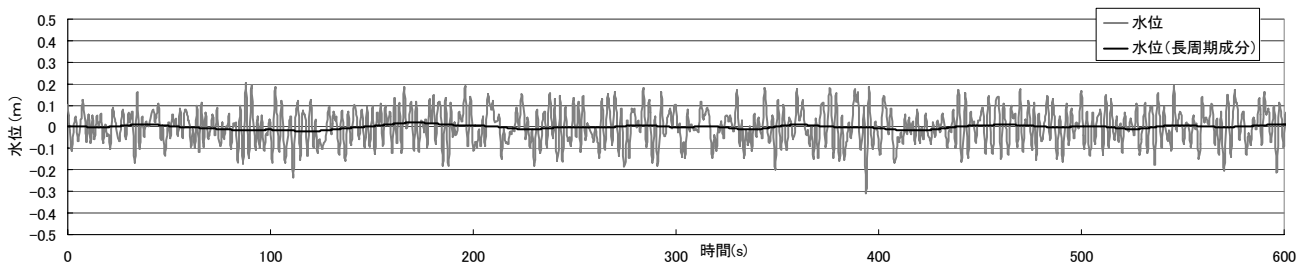


(2) No.2 地点

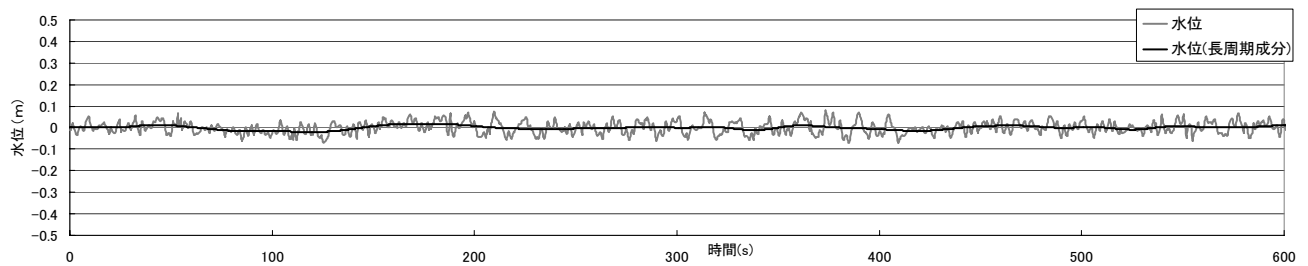


(3) No.3 地点

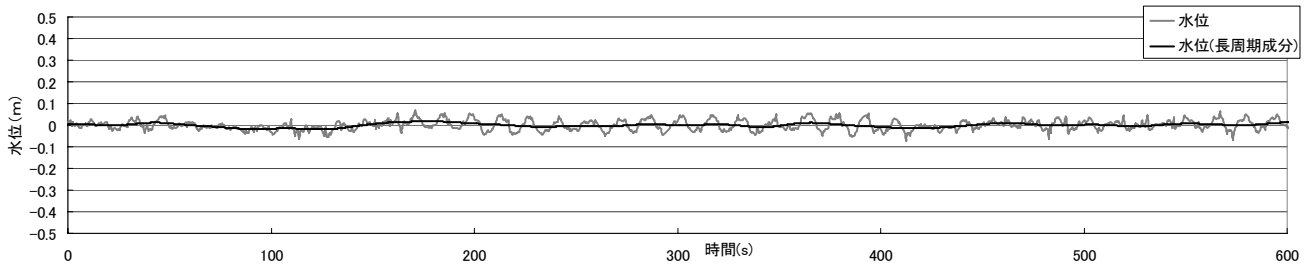
図-14 流速観測値 (2005年8月26日0時)



(1) No.1 地点

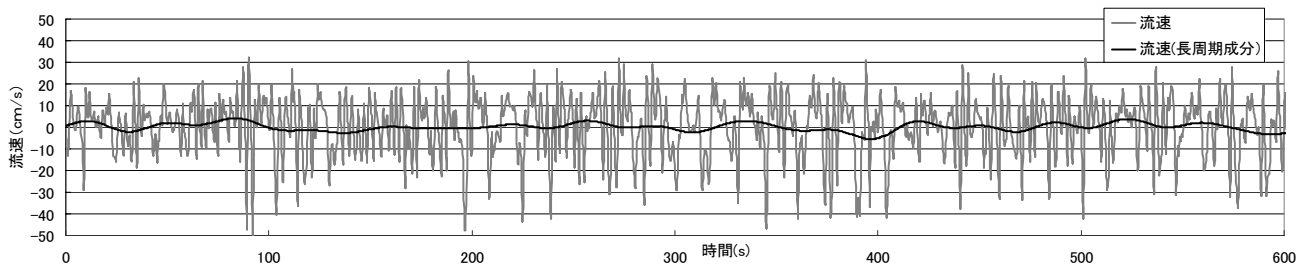


(2) No.2 地点

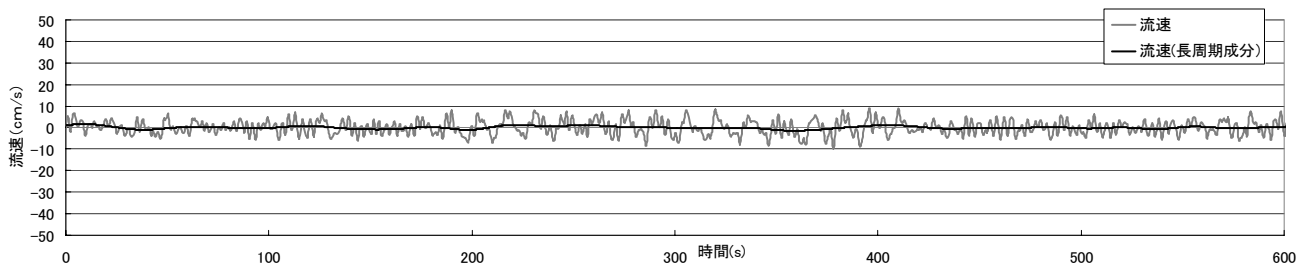


(3) No.3 地点

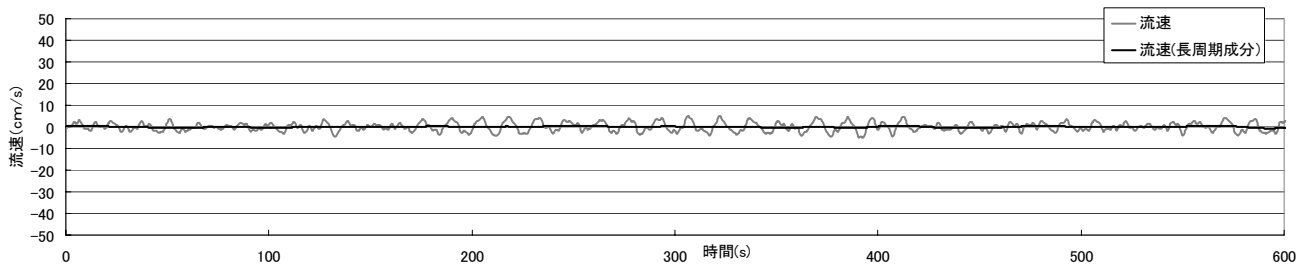
図-15 水位観測値 (2005年9月6日0時)



(1) No.1 地点

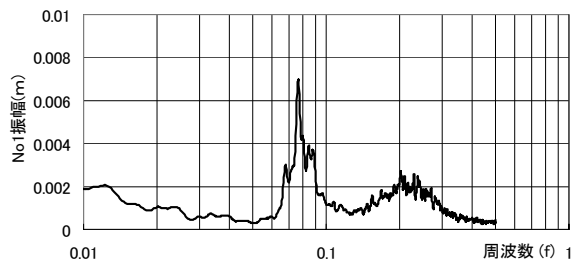


(2) No.2 地点

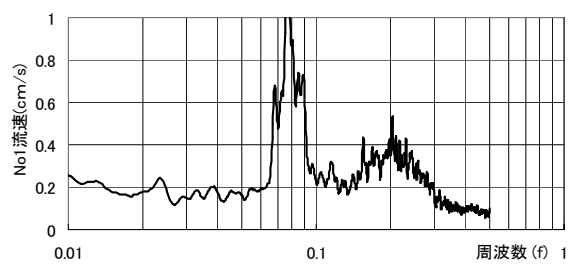


(3) No.3 地点

図-16 流速観測値 (2005年9月6日0時)

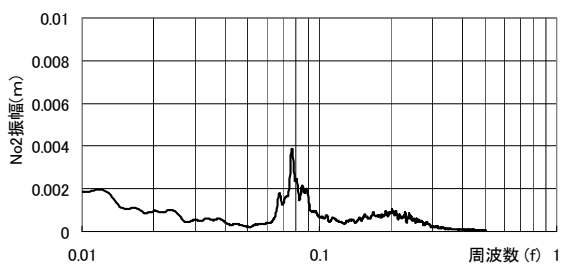


(a) 水位

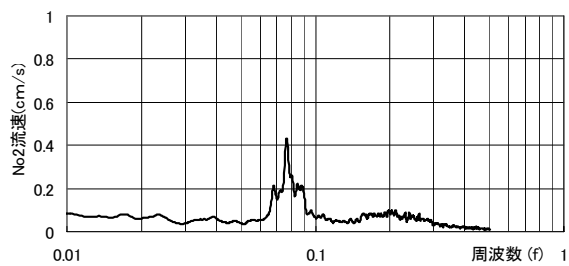


(b) 流速

(1) No.1 地点

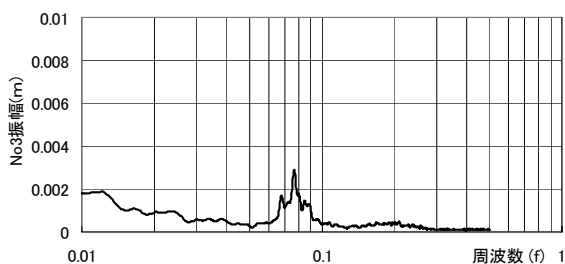


(a) 水位

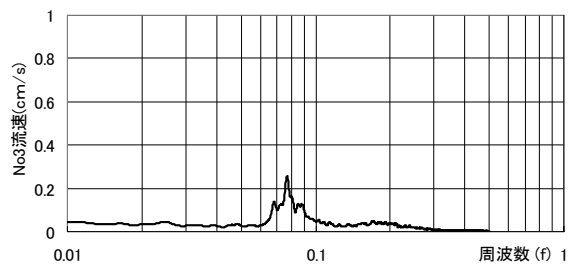


(b) 流速

(2) No.2 地点



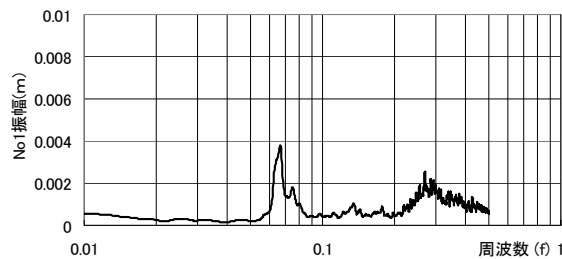
(a) 水位



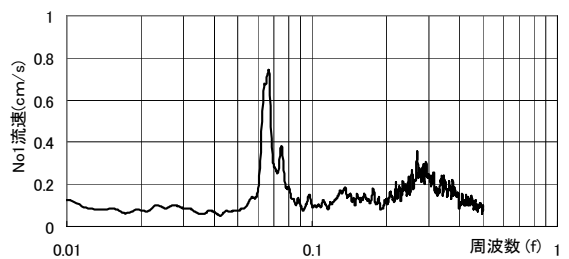
(b) 流速

(3) No.3 地点

図-17 スペクトル解析結果 8月26日00時

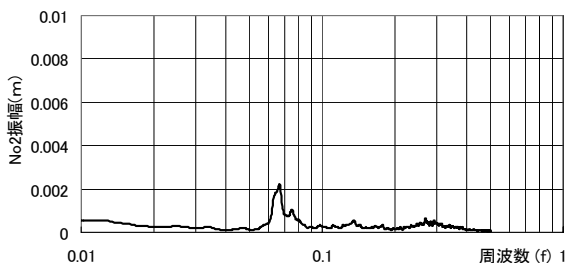


(a) 水位

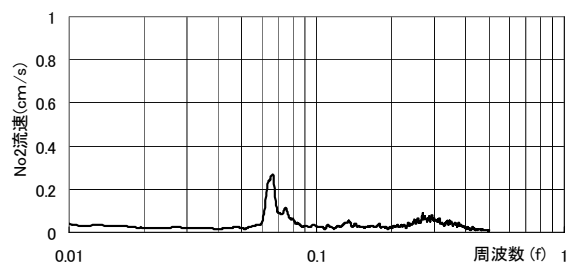


(b) 流速

(1) No.1 地点



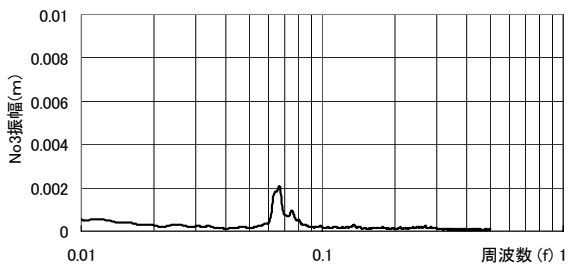
(a) 水位



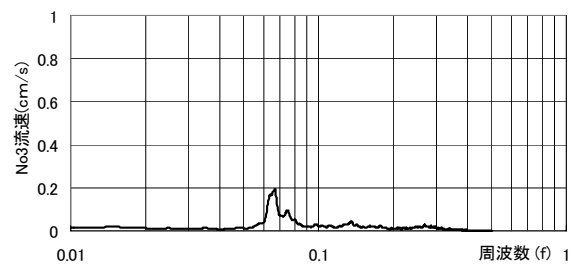
(b) 流速

(2) No.2 地点

図-18(1) スペクトル解析結果(9月6日00時)



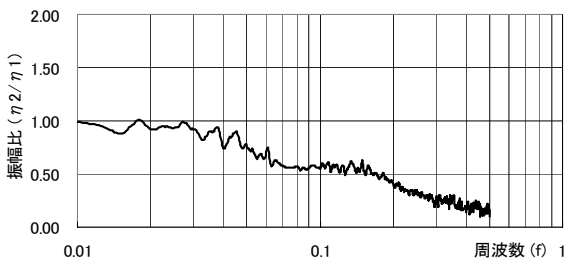
(a) 水位



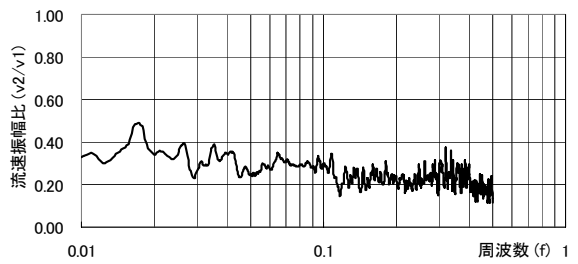
(b) 流速

(3) No.3 地点

図-18 スペクトル解析結果 (9月6日00時)

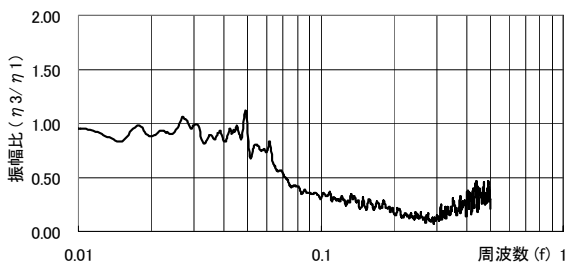


(a) 水位

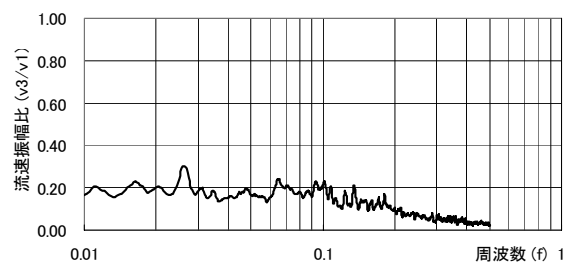


(b) 流速

(1) No.2 地点 / No.1 地点

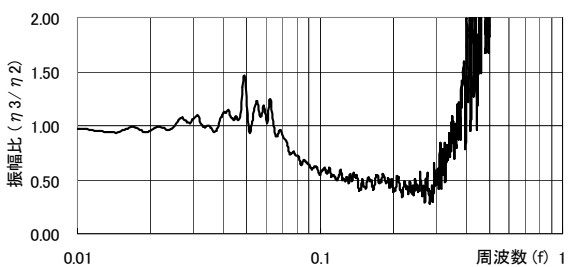


(a) 水位

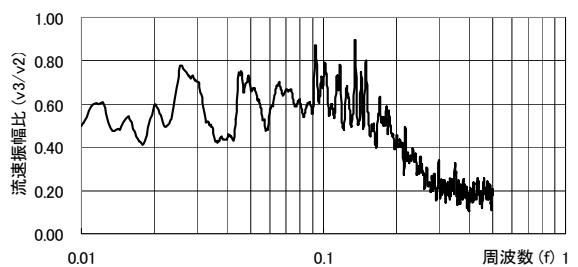


(b) 流速

(2) No.3 地点/No.1 地点



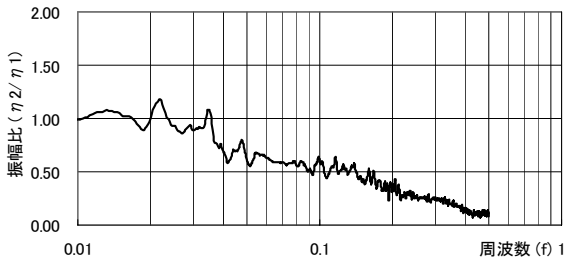
(a) 水位



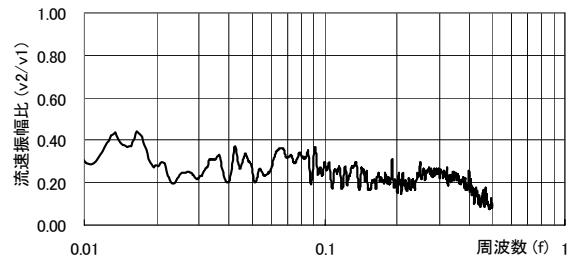
(b) 流速

(3) No.3 地点/No.2 地点

図-19 スペクトル振幅比 (8月26日00時)

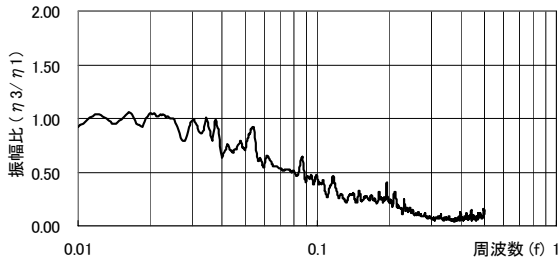


(a) 水位

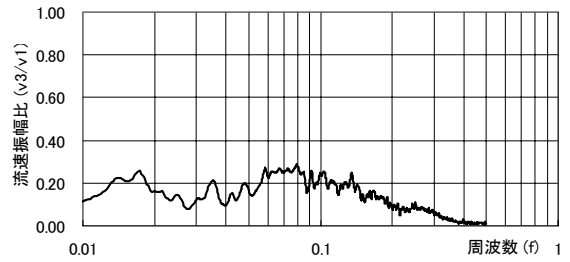


(b) 流速

(1) No.2 地点 / No.1 地点

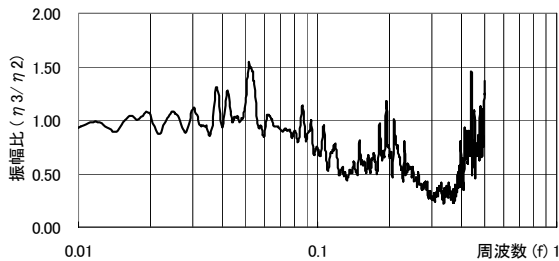


(a) 水位

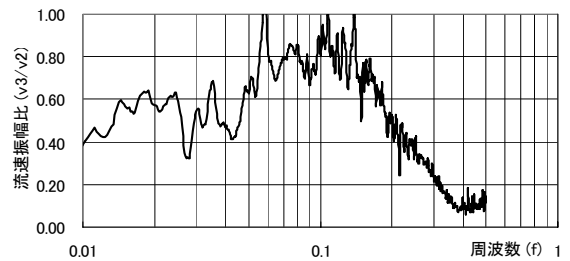


(b) 流速

(2) No.3 地点 / No.1 地点



(a) 水位



(b) 流速

(3) No.3 地点 / No.2 地点

図-20 スペクトル振幅比 9月6日00時

3.2 砂礫透水層内のエネルギー損失の検討

波の反射率は、入射波の持っているエネルギーに対し、透水層内で失われるエネルギーを減じた反射波エネルギーとの比として考えられる。ここでは、前章で示した馬堀海岸高潮対策護岸における透水砂礫層内の流速および水位の現地観測結果を用いて、水流動が透水層内で失われるエネルギーを損失水頭として算出した。さらに、透水層（裏込め材）の石材特性値から Dupuit-Forchheimer 則によるエネルギー損失を推定し、その適用性を調べた。なお、Dupuit-Forchheimer 則は準一様流の仮定で求められており現地での非定常流に対して厳密には適用できない。したがって本調査での損失の推定値は、近似値として理解されたい。

(1) 現地観測結果より求まる損失水頭

ここでは、一般的な透水層間の水流動を考える。流れの方向に l だけ離れた地点 1 と地点 2 における断面でベルヌーイの定理を適用すると式(1)となる。

ーイの定理を適用すると式(1)となる。

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_l \quad (1)$$

$$\text{水面こう配線： } I = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2)$$

$$\text{エネルギーこう配線： } I_e = I - \frac{1}{2gl}(v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

$$\text{損失水頭： } h_l \quad (4)$$

ここで、 v ：流速、 z ：基準面より流心までの高さ、 p ：管内圧力、 h_l ：損失水頭である。

損失水頭 h_l は、地点 1 と地点 2 の全エネルギーの差となる。図-21 に水路における損失水頭のイメージを示す。

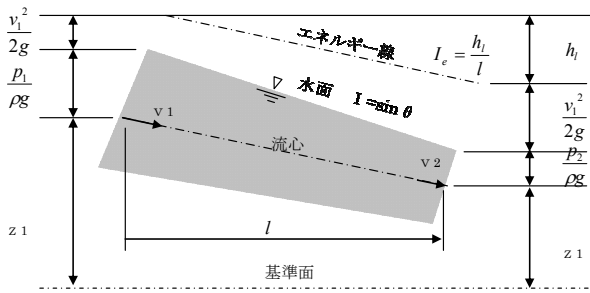


図-21 開水路のベルヌーイの定理のイメージ

a) 水位（波高）から求めた損失水頭

単位面積当たりの水柱を考え、水柱の持つ波のエネルギーを微小振幅波理論により計算すると、位置エネルギー E_p と運動エネルギー E_k の単位面積当たりのエネルギー（ $N \cdot m/m^2$ ）は式（5）となる。

$$E_p = E_k = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度（海水では $1030kg/m^3$ ）である。

従って、単位面積当たりに水面から水底までの水柱の持つエネルギーを E で示すと式（6）となる。

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (6)$$

いま、地点1と地点2の波高を H_1, H_2 、地点1地点2間の距離を l とし、エネルギー減衰を E_{loss} とすると次式（7）

となる。

$$\frac{1}{8} \rho g H_1^2 = \frac{1}{8} \rho g H_2^2 + E_{loss} \quad (7)$$

よって、単位長さ当たりのエネルギー減衰は式（8）となる。

$$E_{loss} = \frac{\rho g}{8} (H_1^2 - H_2^2) \quad (8)$$

また、損失水頭 Δh_H は、エネルギーを ρg で除して水深を h とすれば、式（9）となる。

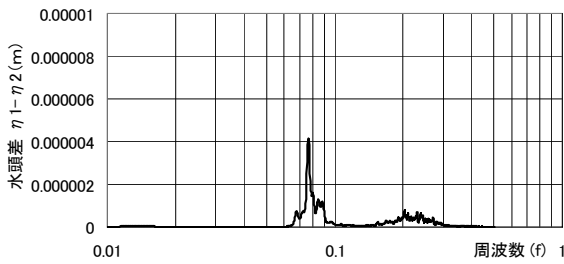
$$\Delta h_H = \frac{E_{loss}}{\rho g h} = \frac{\rho g}{8 \rho g h} (H_1^2 - H_2^2) = \frac{1}{8h} (H_1^2 - H_2^2) \quad (9)$$

前章で示した2005年8月26日0時および9月6日0時の1時間の振幅スペクトルについて、周波数成分ごとに算出した各観測地点間の損失水頭を図-22～図-23に示す。なお、波高 H は振幅 η の2倍として計算を行った。

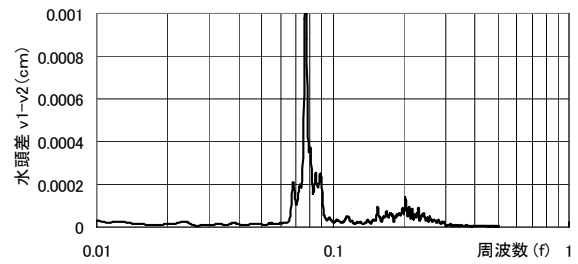
b) 流速から求めた損失水頭

流速から求めた損失水頭は式（3）により海底勾配はほぼ水平とみなせるものとする $I=0$ となることから、計算では以下の式を適用した。

$$\Delta h_v = \frac{1}{2g} (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

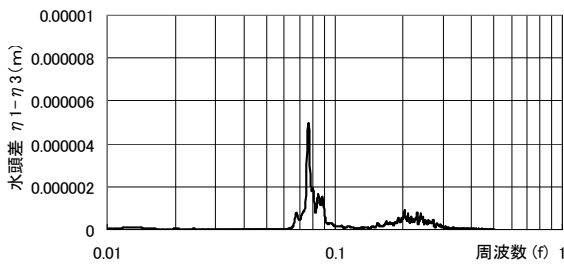


(a) 水位から求めた損失水頭

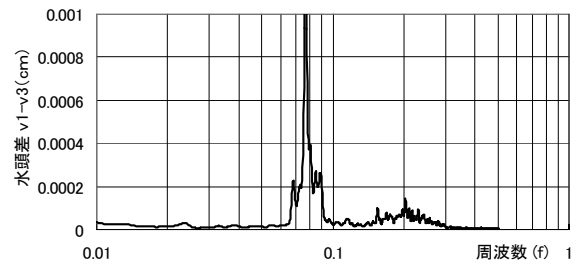


(b) 流速から求めた損失水頭

(1) No.1-No.2間の損失水頭



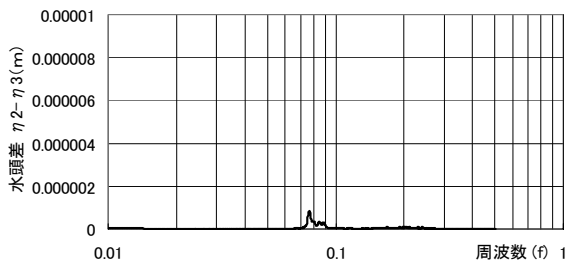
(a) 水位から求めた損失水頭



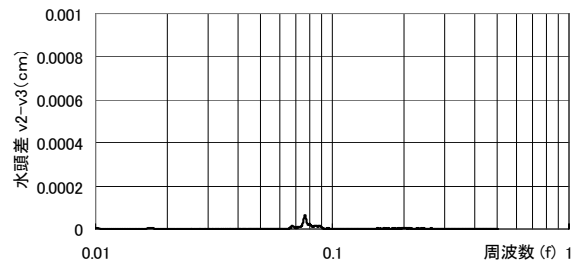
(b) 流速から求めた損失水頭

(2) No.2-No.3間の損失水頭

図-22(1) 損失水頭の解析結果(8月26日00時)



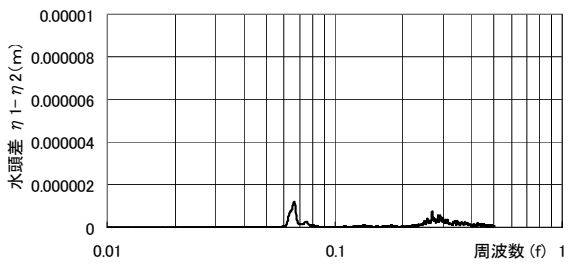
(a) 水位から求めた損失水頭



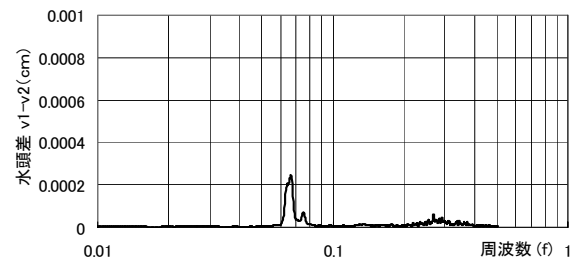
(2) 流速から求めた損失水頭

(3) No.2-No.3 間の損失水頭

図-22 損失水頭の解析結果(8月26日00時)

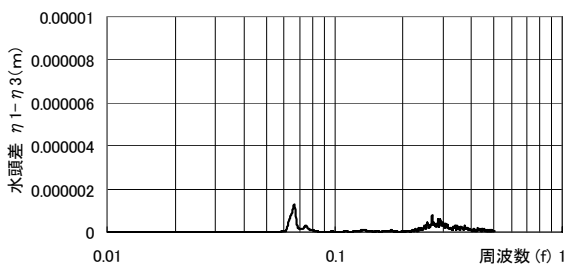


(a) 水位から求めた損失水頭

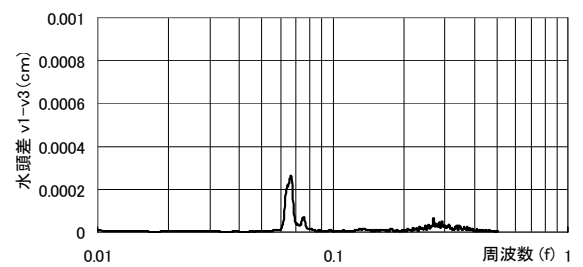


(b) 流速から求めた損失水頭

(1) No.1-No.2 間の損失水頭

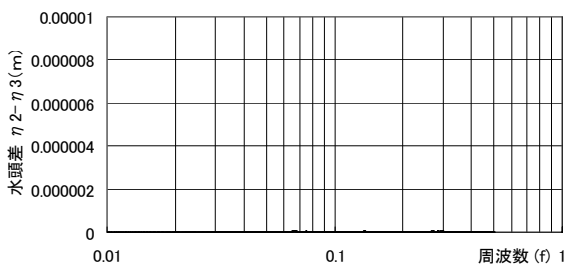


(a) 水位から求めた損失水頭

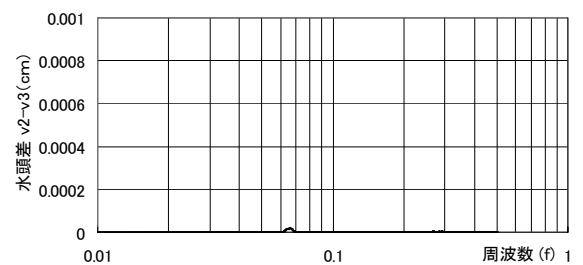


(b) 流速から求めた損失水頭

(2) No.2-No.3 間の損失水頭



(a) 水位から求めた損失水頭



(b) 流速から求めた損失水頭

(3) No.2-No.3 間の損失水頭

図-23 損失水頭の解析結果(9月6日00時)

(2) Dupuit-Forchheimer則より求めた損失水頭

次に Dupuit-Forchheimer 則を用い、裏込め材の石材特性値から水頭損失係数を求め、近似解として損失水頭を算出することを試みた。

一次元の定常流では、透水砂礫層が流れに及ぼす抵抗を、損失水頭の形で表現した Dupuit-Forchheimer 則の式が一般に成立する。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = (\alpha + \beta|q|)q \quad (14)$$

ここで、 α および β は、消波層内の空隙と材料特性から求まる係数で、次式で表される。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\mu}{d^2} \quad (15)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (16)$$

また、流れの方向に一定の距離 l だけ離れた地点 1 と地点 2 における損失水頭 Δh_e は以下のとおりとなる。

$$\Delta h_e = \frac{q}{g} (\alpha + \beta|q|) = \left[2 \left(\beta + \frac{\alpha}{|q|} \right) \right] \cdot \frac{|q|}{2g} \quad (17)$$

なお、 $q = \lambda u$ 、 u : 流速、 ρ : 流体の密度、 μ : 動粘性係数、 d : 捨石粒径、 λ : 空隙率である。

近藤ら (1981) は、実験結果を基に、材料係数 $\alpha_0 = 800 \sim 1500$ 、 $\beta_0 = 1.8 \sim 3.6$ を提案している。本研究では、材料係数 $\alpha_0 = 1000$ 、 $\beta_0 = 2.0$ 、捨石粒径および透水層の空隙率は、2.3 章の試験結果より $d = 0.40\text{m}$ 、 $\lambda = 39\%$ として計算した。なお、石材の粒径は表面の長軸値であり、球の直径に換算した数値より大きい。また流速 u については、ゼロアップクロスによる流速観測値の統計値から No.3 地点の平均流速を用いて計算した。解析に用いた 2005 年 8 月 26 日および 9 月 26 日の各時刻における波高、流速の統計値を表-4~表-7 に示す。表中の添え字 1,2,3 はそれぞれ観測点 No.1, No.2 および No.3 での値であることを示す。うねりの統計値は、1 時間の観測データをゼロアップクロス法で統計解析して求めたものである。長周期波の成分は、スペクトル解析結果のエネルギー密度から、30s~300s の範囲に含まれるゼロ次モーメントを計算して、平方根に 3.6 を乗じて求めている。損失水頭の計算結果一覧を表-8~表-11 に示す。

表-4 ゼロアップクロスによる波高および流速統計値 (2005 年 8 月 26 日, うねり成分)

時刻 t	有義波高			流速 (有義値)			平均流速		
	No.1 $H_{1(1/3)}$ (cm)	No.2 $H_{2(1/3)}$ (cm)	No.3 $H_{3(1/3)}$ (cm)	No.1 $u_{1(1/3)}$ (cm/s)	No.2 $u_{2(1/3)}$ (cm/s)	No.3 $u_{3(1/3)}$ (cm/s)	No.1 u_{1mean} (cm/s)	No.2 u_{2mean} (cm/s)	No.3 u_{3mean} (cm/s)
0:00	38.00	19.00	14.00	81.94	18.78	10.82	53.33	12.56	7.33
1:00	39.00	20.00	15.00	85.57	20.73	12.16	59.45	13.93	8.39
2:00	37.00	20.00	15.00	84.23	20.10	11.88	55.78	13.47	8.34
3:00	43.00	15.00	12.00	89.06	17.21	8.88	60.27	12.31	6.09
4:00	45.00	14.00	10.00	92.13	16.68	7.63	57.40	11.70	5.54
5:00	32.00	13.00	9.00	69.28	13.57	7.30	44.79	9.91	5.32
6:00	23.00	11.00	9.00	43.98	10.65	6.79	26.95	7.54	4.66
7:00	18.00	10.00	7.00	29.78	8.92	5.82	18.22	6.16	3.93
8:00	18.00	9.00	7.00	29.31	8.80	4.96	18.27	6.19	3.46
9:00	16.00	8.00	7.00	29.85	8.94	5.31	18.01	6.12	3.54
10:00	18.00	9.00	8.00	30.32	9.12	5.20	17.83	6.11	3.55
11:00	17.00	8.00	7.00	26.88	8.38	5.37	15.98	5.71	3.67
12:00	17.00	9.00	8.00	27.44	8.12	5.40	16.11	5.55	3.68
13:00	16.00	9.00	8.00	27.99	8.16	6.35	16.87	5.48	1.25
14:00	18.00	10.00	8.00	31.44	8.85	6.35	18.91	5.99	4.31
15:00	15.00	8.00	7.00	23.72	7.35	5.47	14.01	4.94	3.76
16:00	15.00	8.00	7.00	24.09	7.62	5.53	14.06	5.22	3.71
17:00	13.00	7.00	7.00	19.39	6.68	4.86	11.60	4.49	3.25
18:00	14.00	8.00	7.00	22.58	7.46	4.96	13.40	5.04	3.37
19:00	15.00	7.00	6.00	27.76	7.82	3.51	16.60	5.29	2.33
20:00	13.00	6.00	6.00	24.16	7.20	3.47	14.54	4.73	2.32
21:00	14.00	7.00	6.00	24.23	7.52	3.87	14.68	4.95	2.57
22:00	13.00	7.00	7.00	17.14	5.97	4.03	10.41	4.07	2.67
23:00	12.00	7.00	7.00	19.78	6.12	4.54	11.67	4.15	3.04

表-5 ゼロアップクロスによる波高および流速統計値 (2005年8月26日, 長周期成分)

時刻 t	有義波高 (長周期)			流速 (長周期) (有義値)			平均流速(長周期)		
	No.1 $H_{1(1/3)}$ (cm)	No.2 $H_{2(1/3)}$ (cm)	No.3 $H_{3(1/3)}$ (cm)	No.1 $u_{1(1/3)}$ (cm/s)	No.2 $u_{2(1/3)}$ (cm/s)	No.3 $u_{3(1/3)}$ (cm/s)	No.1 u_{1mean} (cm/s)	No.2 u_{2mean} (cm/s)	No.3 u_{3mean} (cm/s)
0:00	13.00	12.00	12.00	14.06	4.83	2.70	9.08	3.18	1.79
1:00	14.00	13.00	13.00	16.30	5.35	3.07	10.32	3.39	2.01
2:00	16.00	16.00	16.00	15.19	5.55	3.22	10.07	3.60	2.02
3:00	13.00	13.00	12.00	16.16	4.86	2.32	10.98	3.20	1.50
4:00	10.00	10.00	10.00	17.30	3.42	1.63	11.13	2.09	1.05
5:00	6.00	6.00	7.00	11.90	2.70	1.23	8.08	1.61	0.86
6:00	4.00	4.00	4.00	8.30	2.40	1.13	5.30	1.44	0.72
7:00	4.00	4.00	4.00	7.05	1.82	1.04	4.58	1.12	0.67
8:00	3.00	3.00	3.00	6.14	1.82	0.98	4.12	1.11	0.65
9:00	2.00	2.00	3.00	5.55	1.65	0.85	3.79	1.04	0.57
10:00	2.00	2.00	2.00	6.46	1.30	0.75	4.06	0.83	0.50
11:00	2.00	2.00	2.00	5.50	1.52	0.70	3.62	0.93	0.46
12:00	2.00	2.00	3.00	5.07	1.41	0.80	3.38	0.99	0.50
13:00	2.00	2.00	2.00	5.55	1.46	0.78	3.49	0.97	0.51
14:00	2.00	2.00	2.00	6.16	1.72	0.74	4.06	1.17	0.48
15:00	2.00	2.00	2.00	5.00	1.30	0.60	3.18	0.87	0.38
16:00	2.00	2.00	2.00	5.32	1.31	0.52	3.62	0.85	0.33
17:00	2.00	2.00	2.00	4.19	1.28	0.47	2.75	0.79	0.32
18:00	2.00	2.00	2.00	4.31	1.21	0.42	3.00	0.79	0.30
19:00	1.00	2.00	2.00	5.76	0.96	0.37	3.61	0.60	0.24
20:00	1.00	2.00	2.00	4.73	0.89	0.36	2.94	0.56	0.23
21:00	1.00	1.00	2.00	5.22	0.75	0.35	3.11	0.48	0.24
22:00	2.00	2.00	2.00	3.74	0.80	0.39	2.60	0.51	0.26
23:00	1.00	1.00	1.00	3.91	0.92	0.41	2.62	0.59	0.27

表-6 ゼロアップクロスによる波高および流速統計値 (2005年9月6日, うねり成分)

時刻 t	有義波高			流速 (有義値)			平均流速		
	No.1 $H_{1(1/3)}$ (cm)	No.2 $H_{2(1/3)}$ (cm)	No.3 $H_{3(1/3)}$ (cm)	No.1 $u_{1(1/3)}$ (cm/s)	No.2 $u_{2(1/3)}$ (cm/s)	No.3 $u_{3(1/3)}$ (cm/s)	No.1 u_{1mean} (cm/s)	No.2 u_{2mean} (cm/s)	No.3 u_{3mean} (cm/s)
0:00	27.00	9.00	8.00	52.22	10.64	7.61	34.74	7.48	4.67
1:00	29.00	11.00	9.00	58.14	12.42	8.42	38.13	8.64	5.56
2:00	23.00	10.00	10.00	46.27	11.90	8.23	28.93	7.63	5.17
3:00	24.00	13.00	13.00	50.24	16.15	10.12	30.18	9.43	7.06
4:00	25.00	14.00	15.00	52.22	18.11	10.41	32.74	11.05	7.59
5:00	25.00	11.00	13.00	45.06	15.54	9.44	28.03	9.31	6.35
6:00	25.00	11.00	12.00	41.21	13.54	8.60	25.48	7.98	5.81
7:00	25.00	11.00	12.00	45.07	14.76	9.04	27.81	8.76	6.35
8:00	23.00	11.00	12.00	44.89	14.43	9.22	27.38	8.55	6.50
9:00	24.00	13.00	11.00	50.36	13.46	9.51	31.28	8.19	6.56
10:00	22.00	10.00	9.00	41.76	10.41	8.26	25.62	6.52	5.44
11:00	20.00	8.00	7.00	34.92	7.70	6.66	21.71	5.04	4.28
12:00	17.00	7.00	6.00	29.61	7.02	6.37	19.36	4.52	4.30
13:00	16.00	8.00	8.00	28.48	8.31	7.24	17.50	4.98	4.81
14:00	15.00	10.00	8.00	28.88	9.59	7.67	16.62	5.69	5.20
15:00	19.00	12.00	10.00	40.91	13.16	8.81	24.50	8.44	6.27
16:00	17.00	11.00	10.00	34.22	12.23	8.20	21.04	7.80	5.73
17:00	15.00	10.00	11.00	34.56	12.69	8.45	22.09	7.98	5.84
18:00	16.00	10.00	10.00	33.79	12.07	8.00	21.04	7.67	5.57
19:00	15.00	10.00	11.00	34.58	12.72	8.22	20.86	7.95	5.62
20:00	16.00	10.00	9.00	31.40	11.49	7.61	19.79	7.54	5.36
21:00	15.00	9.00	9.00	31.83	11.38	7.81	18.58	6.90	5.13
22:00	15.00	10.00	9.00	33.84	11.07	7.98	21.03	7.02	5.62
23:00	10.00	7.00	7.00	21.21	7.35	6.40	12.29	4.47	4.18

表-7 ゼロアップクロスによる波高および流速統計値 (2005年9月6日, 長周期成分)

時刻 t	有義波高 (長周期)			流速 (長周期) (有義値)			平均流速(長周期)		
	No.1 $H_{11(1/3)}$ (cm)	No.2 $H_{12(1/3)}$ (cm)	No.3 $H_{13(1/3)}$ (cm)	No.1 $u_{11(1/3)}$ (cm/s)	No.2 $u_{12(1/3)}$ (cm/s)	No.3 $u_{13(1/3)}$ (cm/s)	No.1 u_{11mean} (cm/s)	No.2 u_{12mean} (cm/s)	No.3 u_{13mean} (cm/s)
0:00	3.00	3.00	3.00	6.31	2.12	0.96	4.13	1.32	0.61
1:00	3.00	3.00	3.00	6.50	2.27	1.31	4.12	1.53	0.80
2:00	3.00	4.00	4.00	6.31	2.49	1.50	4.03	1.67	0.93
3:00	4.00	4.00	4.00	7.11	2.43	1.85	4.50	1.75	1.19
4:00	4.00	4.00	4.00	6.83	2.67	1.91	4.47	1.71	1.33
5:00	4.00	4.00	4.00	7.40	2.49	1.41	4.43	1.54	0.88
6:00	4.00	4.00	4.00	7.19	2.55	1.73	4.29	1.68	1.05
7:00	4.00	4.00	4.00	6.86	2.75	1.64	4.47	1.82	0.98
8:00	4.00	4.00	4.00	6.69	2.17	1.73	4.44	1.44	1.02
9:00	4.00	4.00	4.00	8.24	2.79	1.85	5.14	1.74	1.08
10:00	4.00	4.00	4.00	6.80	2.65	1.11	4.12	1.59	0.76
11:00	3.00	3.00	3.00	5.56	1.56	0.70	3.64	0.97	0.49
12:00	3.00	3.00	3.00	6.00	1.38	0.83	3.71	0.82	0.54
13:00	4.00	4.00	4.00	5.90	1.74	0.93	3.64	0.99	0.58
14:00	4.00	4.00	4.00	5.95	1.78	1.09	3.57	1.12	0.70
15:00	5.00	5.00	5.00	6.83	2.38	1.74	4.21	1.42	1.06
16:00	6.00	6.00	6.00	6.27	2.54	1.60	4.14	1.63	1.06
17:00	4.00	4.00	4.00	6.29	2.72	1.53	4.12	1.78	0.91
18:00	4.00	4.00	4.00	5.78	2.55	1.43	3.69	1.58	0.84
19:00	3.00	3.00	3.00	5.83	2.89	1.39	3.62	1.70	0.87
20:00	3.00	3.00	3.00	4.73	2.11	1.14	3.00	1.30	0.70
21:00	3.00	3.00	3.00	6.22	2.12	1.28	3.77	1.26	0.80
22:00	3.00	3.00	3.00	6.16	1.78	1.04	3.90	1.07	0.63
23:00	3.00	3.00	3.00	4.78	1.22	0.75	2.92	0.77	0.49

表-8 損失水頭計算結果一覧 (2005年8月26日, うねり成分)

時刻 t	損失水頭 Δh_e (cm)	補正值 C'	理論値による 損失水頭(補正值) $\Delta h' = C' \times \Delta h_e$ (cm)	流速水頭 $\Delta h_{(u)}$ $(u_{2(1/3)}^2 - u_{3(1/3)}^2) / 2g$ (cm)	水位水頭 $\Delta h_{(H)}$ $(H_{2(1/3)}^2 - H_{3(1/3)}^2) / 8h$ (cm)	現地観測による 損失水頭 $\Delta h = \Delta h_{(u)} + \Delta h_{(H)}$ (cm)
0:00	4.09	0.068	0.28	0.12	0.21	0.33
1:00	5.35	0.068	0.36	0.14	0.22	0.36
2:00	5.29	0.068	0.36	0.13	0.22	0.35
3:00	2.83	0.068	0.19	0.11	0.10	0.21
4:00	2.34	0.068	0.16	0.11	0.12	0.23
5:00	2.16	0.068	0.15	0.07	0.11	0.18
6:00	1.66	0.068	0.11	0.03	0.05	0.08
7:00	1.18	0.068	0.08	0.02	0.06	0.09
8:00	0.92	0.068	0.06	0.03	0.04	0.07
9:00	0.96	0.068	0.07	0.03	0.02	0.05
10:00	0.97	0.068	0.07	0.03	0.02	0.05
11:00	1.03	0.068	0.07	0.02	0.02	0.04
12:00	1.04	0.068	0.07	0.02	0.02	0.04
13:00	0.12	0.068	0.01	0.01	0.02	0.03
14:00	1.42	0.068	0.10	0.02	0.05	0.06
15:00	1.08	0.068	0.07	0.01	0.02	0.03
16:00	1.06	0.068	0.07	0.01	0.02	0.03
17:00	0.81	0.068	0.06	0.01	0.00	0.01
18:00	0.87	0.068	0.06	0.02	0.02	0.03
19:00	0.42	0.068	0.03	0.02	0.02	0.04
20:00	0.42	0.068	0.03	0.02	0.00	0.02
21:00	0.51	0.068	0.03	0.02	0.02	0.04
22:00	0.55	0.068	0.04	0.01	0.00	0.01
23:00	0.71	0.068	0.05	0.01	0.00	0.01

表-9 損失水頭計算結果一覧 (2005年8月26日, 長周期成分)

時刻 t	損失水頭 Δh_e (cm)	補正值 C'	理論値による 損失水頭(補正值) $\Delta h' = C' \times \Delta h_e$ (cm)	流速水頭 $\Delta h_{(u)}$ $(u_{2(1/3)}^2 - u_{3(1/3)}^2) / 2g$ (cm)	水位水頭 $\Delta h_{(H)}$ $(H_{2(1/3)}^2 - H_{3(1/3)}^2) / 8h$ (cm)	現地観測による 損失水頭 $\Delta h = \Delta h_{(u)} + \Delta h_{(H)}$ (cm)
0:00	0.25	0.035	0.0088	0.0082	0.0000	0.0082
1:00	0.31	0.035	0.0111	0.0098	0.0000	0.0098
2:00	0.32	0.035	0.0112	0.0104	0.0000	0.0104
3:00	0.18	0.035	0.0062	0.0093	0.0313	0.0093
4:00	0.09	0.035	0.0031	0.0046	0.0000	0.0046
5:00	0.06	0.035	0.0021	0.0029	-0.0163	0.0029
6:00	0.04	0.035	0.0015	0.0023	0.0000	0.0023
7:00	0.04	0.035	0.0013	0.0011	0.0000	0.0011
8:00	0.03	0.035	0.0012	0.0012	0.0000	0.0012
9:00	0.03	0.035	0.0010	0.0010	-0.0063	0.0010
10:00	0.02	0.035	0.0007	0.0006	0.0000	0.0006
11:00	0.02	0.035	0.0006	0.0009	0.0000	0.0009
12:00	0.02	0.035	0.0007	0.0007	-0.0063	0.0007
13:00	0.02	0.035	0.0008	0.0008	0.0000	0.0008
14:00	0.02	0.035	0.0007	0.0012	0.0000	0.0012
15:00	0.01	0.035	0.0004	0.0007	0.0000	0.0007
16:00	0.01	0.035	0.0003	0.0007	0.0000	0.0007
17:00	0.01	0.035	0.0003	0.0007	0.0000	0.0007
18:00	0.01	0.035	0.0003	0.0007	0.0000	0.0007
19:00	0.01	0.035	0.0002	0.0004	0.0000	0.0004
20:00	0.01	0.035	0.0002	0.0003	0.0000	0.0003
21:00	0.01	0.035	0.0002	0.0002	-0.0038	0.0002
22:00	0.01	0.035	0.0002	0.0002	0.0000	0.0002
23:00	0.01	0.035	0.0002	0.0003	0.0000	0.0003

表-10 損失水頭計算結果一覧 (2005年9月6日, うねり成分)

時刻 t	損失水頭 Δh_e (cm)	補正值 C'	理論値による 損失水頭(補正值) $\Delta h' = C' \times \Delta h_e$ (cm)	流速水頭 $\Delta h_{(u)}$ $(u_{2(1/3)}^2 - u_{3(1/3)}^2) / 2g$ (cm)	水位水頭 $\Delta h_{(H)}$ $(H_{2(1/3)}^2 - H_{3(1/3)}^2) / 8h$ (cm)	現地観測による 損失水頭 $\Delta h = \Delta h_{(u)} + \Delta h_{(H)}$ (cm)
0:00	1.67	0.019	0.03	0.03	0.02	0.05
1:00	2.36	0.019	0.05	0.04	0.05	0.09
2:00	2.04	0.019	0.04	0.04	0.00	0.04
3:00	3.79	0.019	0.07	0.08	0.00	0.08
4:00	4.38	0.019	0.08	0.11	-0.04	0.08
5:00	3.07	0.019	0.06	0.08	-0.06	0.02
6:00	2.57	0.019	0.05	0.06	-0.03	0.03
7:00	3.07	0.019	0.06	0.07	-0.03	0.04
8:00	3.22	0.019	0.06	0.06	-0.03	0.03
9:00	3.28	0.019	0.06	0.05	0.06	0.11
10:00	2.26	0.019	0.04	0.02	0.02	0.04
11:00	1.40	0.019	0.03	0.01	0.02	0.03
12:00	1.41	0.019	0.03	0.00	0.02	0.02
13:00	1.77	0.019	0.03	0.01	0.00	0.01
14:00	2.06	0.019	0.04	0.02	0.05	0.06
15:00	2.99	0.019	0.06	0.05	0.06	0.10
16:00	2.50	0.019	0.05	0.04	0.03	0.07
17:00	2.60	0.019	0.05	0.05	-0.03	0.02
18:00	2.37	0.019	0.05	0.04	0.00	0.04
19:00	2.41	0.019	0.05	0.05	-0.03	0.02
20:00	2.19	0.019	0.04	0.04	0.02	0.06
21:00	2.01	0.019	0.04	0.03	0.00	0.03
22:00	2.41	0.019	0.05	0.03	0.02	0.05
23:00	1.34	0.019	0.03	0.01	0.00	0.01

表-11 損失水頭計算結果一覧 (2005年9月6日, 長周期成分)

時刻 t	損失水頭 Δh_e (cm)	補正值 C'	理論値による 損失水頭(補正值) $\Delta h' = C' \times \Delta h_e$ (cm)	流速水頭 $\Delta h_{(u)}$ $(u_{2(1/3)}^2 - u_{3(1/3)}^2) / 2g$ (cm)	水位水頭 $\Delta h_{(H)}$ $(H_{2(1/3)}^2 - H_{3(1/3)}^2) / 8h$ (cm)	現地観測による 損失水頭 $\Delta h = \Delta h_{(u)} + \Delta h_{(H)}$ (cm)
0:00	0.03	0.024	0.0007	0.0018	0.0000	0.0018
1:00	0.05	0.024	0.0012	0.0018	0.0000	0.0018
2:00	0.07	0.024	0.0016	0.0020	0.0000	0.0020
3:00	0.11	0.024	0.0027	0.0013	0.0000	0.0013
4:00	0.14	0.024	0.0033	0.0018	0.0000	0.0018
5:00	0.06	0.024	0.0015	0.0021	0.0000	0.0021
6:00	0.09	0.024	0.0021	0.0018	0.0000	0.0018
7:00	0.08	0.024	0.0018	0.0025	0.0000	0.0025
8:00	0.08	0.024	0.0020	0.0009	0.0000	0.0009
9:00	0.09	0.024	0.0022	0.0022	0.0000	0.0022
10:00	0.05	0.024	0.0011	0.0030	0.0000	0.0030
11:00	0.02	0.024	0.0005	0.0010	0.0000	0.0010
12:00	0.02	0.024	0.0006	0.0006	0.0000	0.0006
13:00	0.03	0.024	0.0007	0.0011	0.0000	0.0011
14:00	0.04	0.024	0.0010	0.0010	0.0000	0.0010
15:00	0.09	0.024	0.0021	0.0013	0.0000	0.0013
16:00	0.09	0.024	0.0021	0.0020	0.0000	0.0020
17:00	0.07	0.024	0.0016	0.0026	0.0000	0.0026
18:00	0.06	0.024	0.0014	0.0023	0.0000	0.0023
19:00	0.06	0.024	0.0014	0.0033	0.0000	0.0033
20:00	0.04	0.024	0.0010	0.0016	0.0000	0.0016
21:00	0.05	0.024	0.0012	0.0015	0.0000	0.0015
22:00	0.03	0.024	0.0008	0.0011	0.0000	0.0011
23:00	0.02	0.024	0.0005	0.0005	0.0000	0.0005

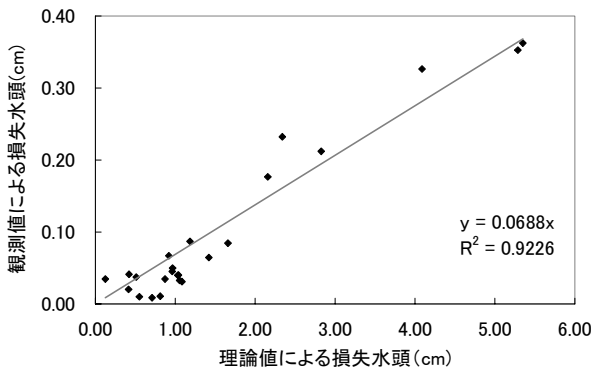


図-24 観測地と理論値の相関 (8月26日, うねり成分)

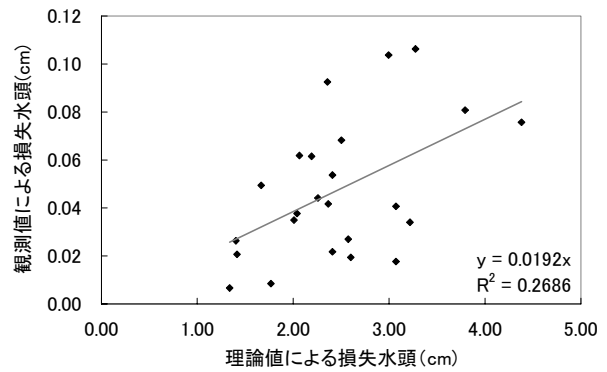


図-26 観測地と理論値の相関 (9月6日, うねり成分)

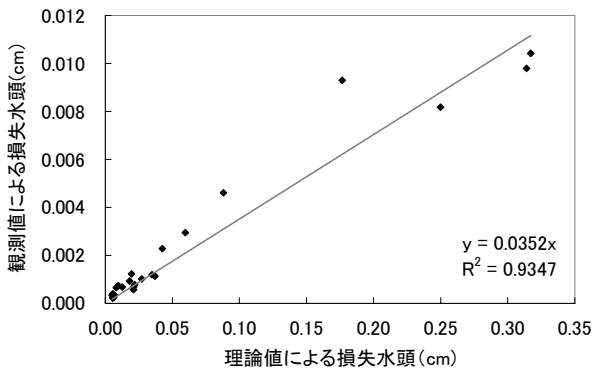


図-25 観測地と理論値の相関 (8月26日, 長周期成分)

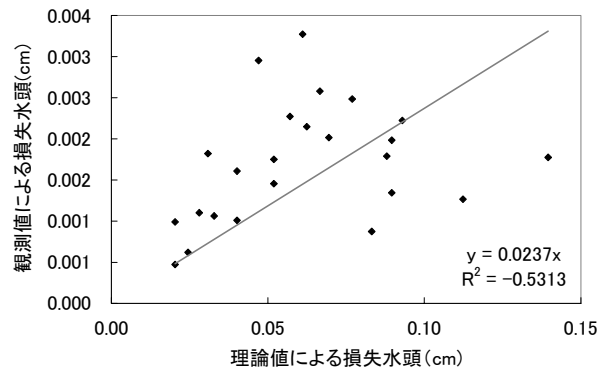


図-27 観測地と理論値の相関 (9月6日, 長周期成分)

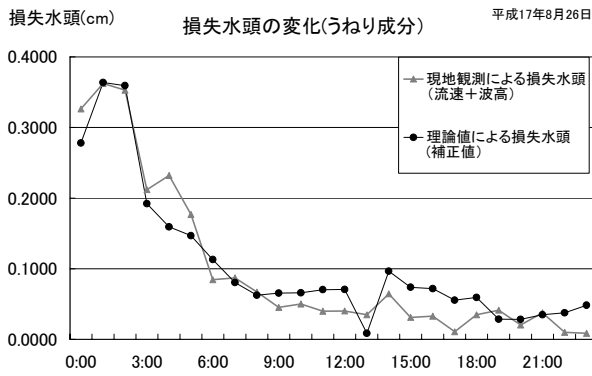


図-28 損失水頭の時系列変化 (8月26日, うねり成分)

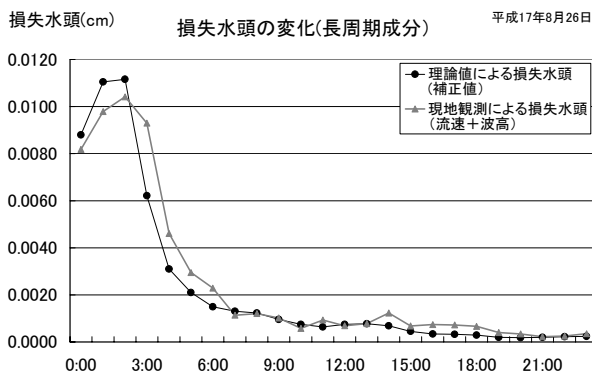


図-29 損失水頭の時系列変化 (8月26日, 長周期成分)

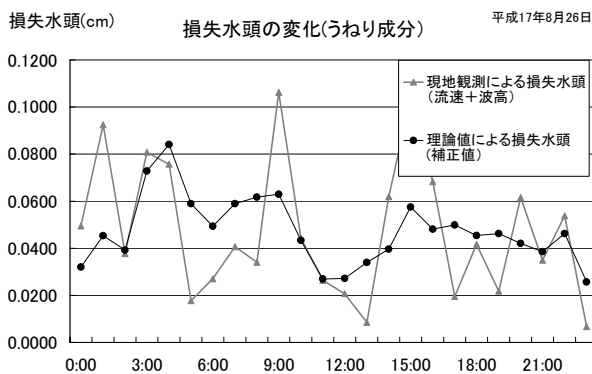


図-30 損失水頭の時系列変化 (9月6日, うねり成分)

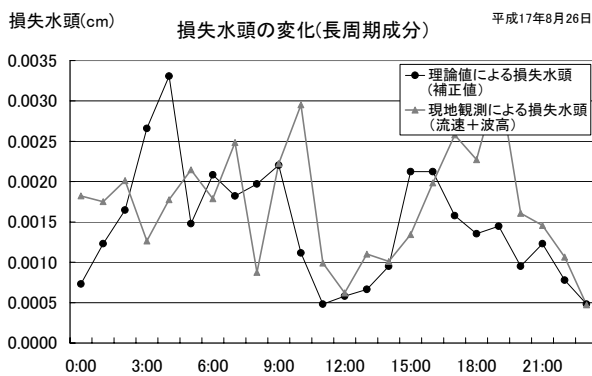


図-31 損失水頭の時系列変化 (9月6日, 長周期成分)

現地観測における水位 (波高) および流速値より算出した損失水頭と, Dupuit-Forchheimer 則による圧力損失計算によって算出した損失水頭との間に, 図-24~図-27 に示す相関関係があることが判明した. この一次近似式の係数を補正係数 C' として, Dupuit-Forchheimer 則による理論的に算出した損失水頭 Δh_e に乗じて損失水頭 $\Delta h'$ を算出した. 損失水頭 $\Delta h'$ と現地観測値による損失水頭 Δh を比較し結果を 図-28~図-31 に示す. 両者はよく一致し, Dupuit-Forchheimer 則による損失水頭が精度よく計算されていることがわかる. ここで, 図-28 および図-30 が, 観測値を統計解析して得られた流速値から計算されたエネルギー損失水頭である. 現地観測値では, うねりが卓越していたので, うねりによる損失水頭として示す.

図-29 および図-31 は長周期波に相当する成分から得られた流速によって計算した結果である. 長周期波成分の流速代表値は, 30s~300s のスペクトル密度を積分して, 平方根に 3.6 倍して求めている. ただし, 本観測ケースは長周期波の影響が小さい場所で得られた値であり, 絶対値は小さい.

図-28 および 29 に示されるように, 8月26日は, 入射波高が大きく, 観測値の変化を推算値で表すことが妥当と考えられる. ただし, 補正係数を求めて絶対値がほぼ一致するようにエネルギー損失を求めており, 時間的な変化が一致したとしても, 材料係数の決定について今後も検討する課題は大きい. また, 往復流として時間的に変動している流動の損失を一定の損失式で近似しており, 今後は, 時間的に変動する流れに対するエネルギー損失を考慮していく必要がある.

3.3 現地観測結果による反射率の推定

2005年8月26日6時と同年9月6日4時の反射率を算定した. 反射率は合田ら (1976) と久保田ら (1989) によって提案された擬似非線形長波理論 (QNL) を適用した.

$$\eta_i = \frac{1}{2} \left[\eta + u \sqrt{\frac{d}{g}} \bullet \frac{d}{d-\eta} \right] \quad (14)$$

$$\eta_r = \frac{1}{2} \left[\eta - u \sqrt{\frac{d}{g}} \bullet \frac{d}{d-\eta} \right] \quad (15)$$

波高計は No.1 (沖側) と No.3 (岸側) の波高計を用いた. 波高計の距離は 13.5m, 水深は 1.5m, 解析に用いたデータ数 4096 個, サンプルタイム 0.5 秒である. したがって, 使用したデータ長は約 30 分である. 合田ら (1976) の方法では f_{min} と f_{max} を表に示す範囲に変化させて求めた. また, 波形は長周期波 (30s~300s) の波形についても計算した. 計算結果を表-12 および表-13 に示すとおりである. 合田式か

ら得られる反射率は 0.8~1.0、久保田らから得られた反射率はほぼ 1.0 であった。

表-12 反射率の計算結果【合田ら (No.1とNo.3の水位)、久保田ら (No.1の水位と流速)】

日時	fmin	fmax		合田		久保田ら
2005/8/26/6	0.002	0.050	No1水-No3水	0.88	No1水-No1流	0.98
	0.020	0.200		0.91		
	0.100	0.200		0.97		
	0.020	0.200	0.91	No3水-No3流	1.13	
	0.002	0.050	No1長水-No3長水	0.91	No1長水-No1長流	1.06
	0.020	0.200		0.82		
0.100	0.200	1.00				
0.002	0.050	0.91	No3水-No3流	1.00		
2005/9/6/4	0.002	0.050	No1水-No3水	0.98	No1水-No1流	1.04
	0.020	0.200		0.89		
	0.100	0.200		0.94		
	0.020	0.200	0.98	No3水-No3流	1.15	
	0.002	0.050	No1長水-No3長水	0.91	No1長水-No1長流	1.07
	0.020	0.200		0.87		
0.100	0.200	0.96				
0.002	0.050	0.91	No3水-No3流	1.00		

表-13 反射率の計算結果【合田ら (No.2とNo.3の水位)、久保田ら (No.2の水位と流速)】

日時	fmin	fmax		合田		久保田ら
2005/8/26/6	0.002	0.050	No2水-No3水	0.88	No2水-No2流	0.70
	0.020	0.200		0.87		
	0.100	0.200		0.88		
	0.020	0.200	0.87	No3水-No3流	1.14	
	0.002	0.050	No2長水-No3長水	0.95	No2長水-No2長流	1.00
	0.020	0.200		0.81		
0.100	0.200	0.96				
0.002	0.050	0.95	No3水-No3流	1.00		
2005/9/6/4	0.002	0.050	No2水-No3水	0.98	No2水-No2流	1.10
	0.020	0.200		0.86		
	0.100	0.200		0.89		
	0.020	0.200	0.86	No3水-No3流	1.15	
	0.002	0.050	No2長水-No3長水	0.96	No2長水-No2長流	1.00
	0.020	0.200		0.90		
0.100	0.200	0.78				
0.002	0.050	0.96	No3水-No3流	1.00		

4. 数値計算による反射率の算定例

4.1 数値計算法の内容

長周期波対策護岸に関する試計算結果を報告する。解析は波の進行方向と鉛直方向の2次元解析として行い、波浪の波長と構造物の関係を明らかにするため、 $T=8, 15, 30$ 秒の正弦波ならびに孤立波を入射させた。一方、長周期波浪を吸収する砂礫層は、その延長を10, 30, 50mの3種類とした。

計算はMARS法を用いた数値波動水槽を用い、2次元解析を行った。本計算手法は、3次元汎用流体解析ソフトを応用したもので、平石ら(2004c)が、礫層の圧力損失の影響などを計算に取り込むことが可能なことを実証した手法である。ただし、材料係数等は仮定して与えている。

図-32に数値波動水槽で実施した解析モデルの概要を示す。まず、波の進行方向の逆向きに x 軸を取り砂礫層の沖側を原点とした。波浪は、規則波の場合には $x=590$ mの地点に造波ソースを設置して造波するとともに、長周期波吸収護岸で反射した波浪など沖向きのはエネルギー吸収

帯で吸収させた。孤立波の場合には、 $x=600$ mの境界に入射境界を設置した。

波浪の入射と共に、 $x=-45, -25, -5, 5, 590$ mと $x=50 \sim 550$ m間の50m間隔で水位と静水面から5m下での流速(x 方向： U 、 z 方向： W)を記録した。

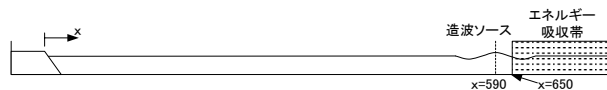


図-32 数値波動水槽の概略

透水層は図-33に示すような構造として、奥行きを $x=0$ から-10, -30, -50mまでの3種類とした。この透水砂礫層での圧力損失に関しては、Dupuit-Forchheimer則を用いて計算を行うが、その内部に含まれる係数 α および β の計算に含まれる粒径は、石材を球で置き換えた直径として、室内実験で得た0.31mを用いた。また空隙率は0.391を用いた。

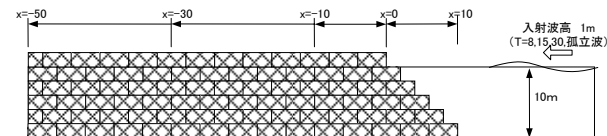


図-33 透水砂礫層の形状

4.2 数値計算の結果

(1) 周期8秒

図-34~図-36に、消波層の長さを10, 30, 50mの3タイプとして解析した結果から、波形と流速の時間変化を示す。入射波浪は周期 $T=8$ 秒、波高1mである。波形から入射波と反射波を計測して反射率を計算すると、それぞれ0.447, 0.433, 0.423となる。消波層が長くなるに従い反射率が小さくなり消波層の内部深くまで波浪が進行する事で減衰することが分かる。また、消波層内流速は波浪に対応していることがわかる。

(2) 周期15秒

図-37~図-39に、周期 $T=15$ 秒の場合の解析結果を示す。波形から入射波と反射波を計測して反射率を計算すると、それぞれ0.699, 0.671, 0.667となる。 $T=8$ 秒の場合と比較して、反射率は0.2程度上昇しており、周期が長くなるにともない消波機能を確保することが難しくなる。

(3) 周期30秒

図-40~図-42に、周期 $T=30$ 秒の場合の解析結果を示す。

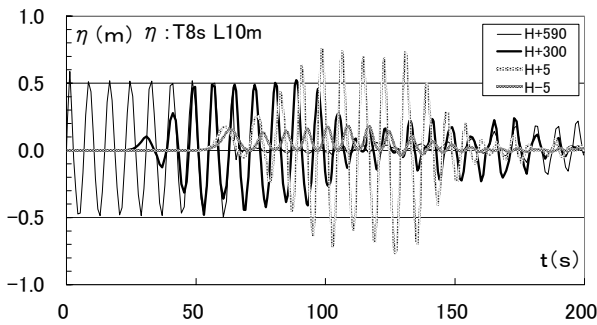
波形から入射波と反射波を計測して反射率を計算すると、それぞれ 0.919, 0.882, 0.876 となる。T=15 秒の場合と比較して、反射率はさらに 0.2 程度上昇している。

(4) 孤立波

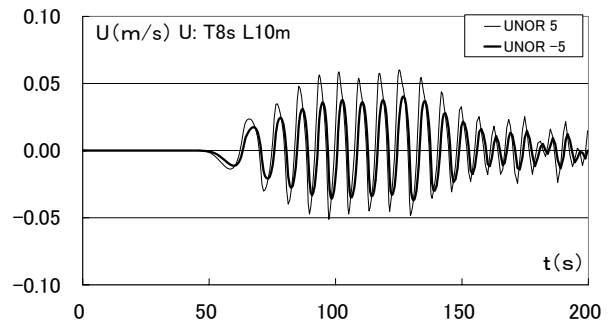
図-43～図-45 に、孤立波による解析結果を示す。波形から入射波と反射波を計測して反射率を計算すると、それぞれ 0.823, 0.786, 0.785 となる。T=15 秒と T=30 秒の結果の中間的な値を取ることがわかった。孤立波は、理論上は波長が無限大であるが、数値計算では周期 60 秒に相当する。

表-14 反射率の比較

	T=8s	T=15s	T=30s	孤立波
L=10m	0.447	0.699	0.919	0.823
L=30m	0.433	0.671	0.882	0.786
L=50m	0.423	0.667	0.876	0.785

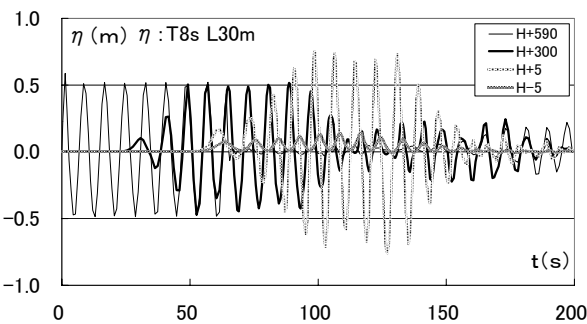


(1) 水位の変化

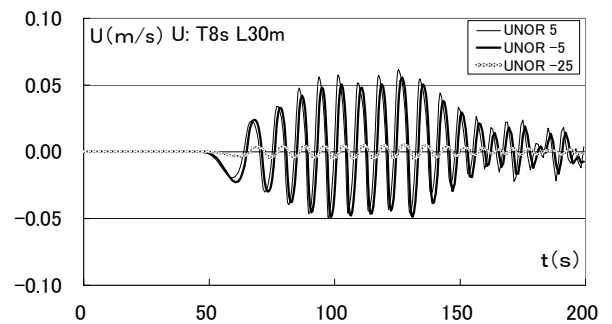


(2) 流速の変化

図-34 風波成分(T=8s)の透水砂礫層内の水位と流速の変化 (消波層延長 L=10m)

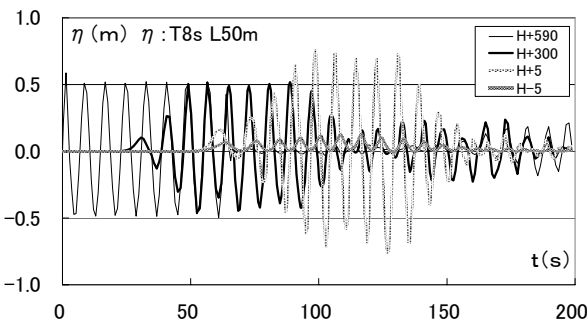


(1) 水位の変化

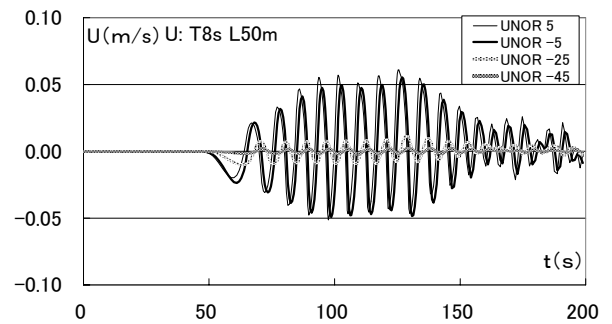


(2) 流速の変化

図-35 風波成分(T=8s)の透水砂礫層内の水位と流速の変化 (消波層延長 L=30m)

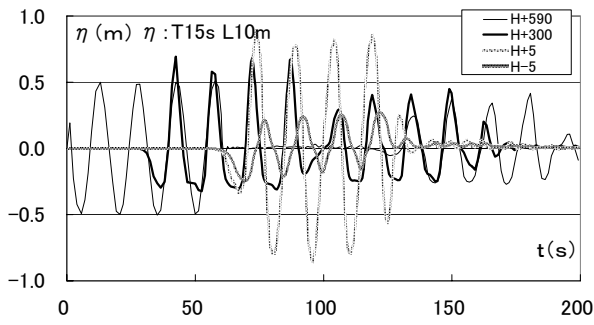


(1) 水位の変化

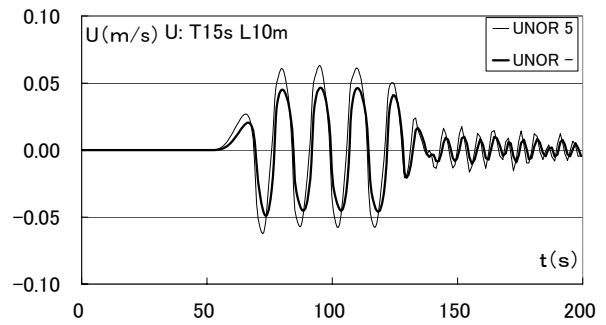


(2) 流速の変化

図-36 風波成分(T=8s)の透水砂礫層内の水位と流速の変化 (消波層延長 L=50m)

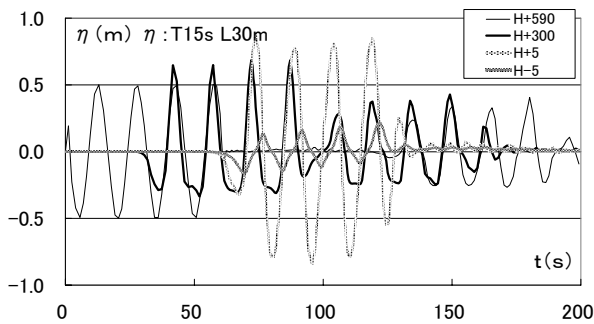


(1) 水位の変化

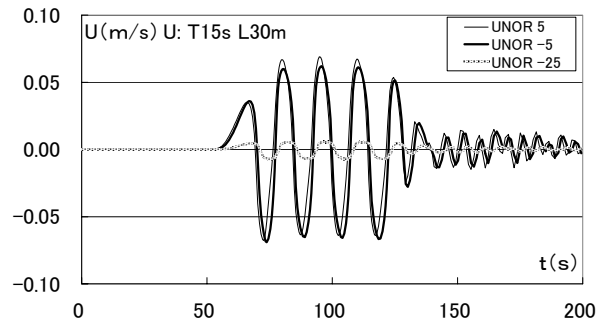


(2) 流速の変化

図-37 風波成分($T=15s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=10m$)

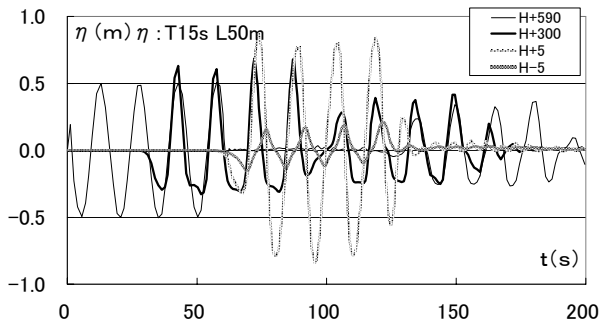


(1) 水位の変化

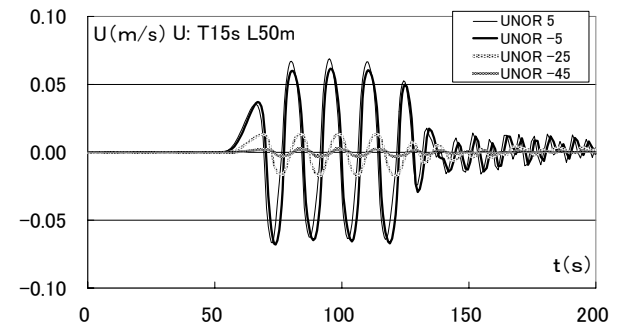


(2) 流速の変化

図-38 風波成分($T=15s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=30m$)

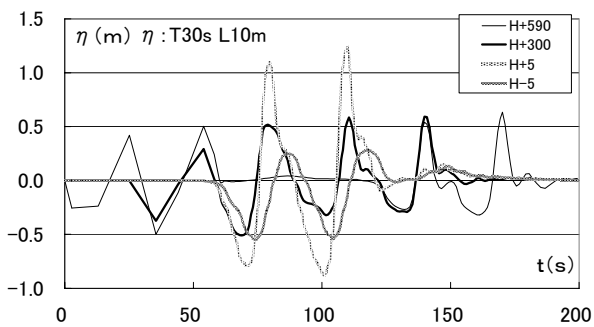


(1) 水位の変化

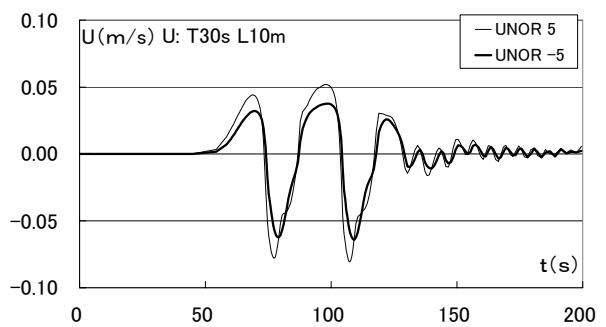


(2) 流速の変化

図-39 風波成分($T=15s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=50m$)

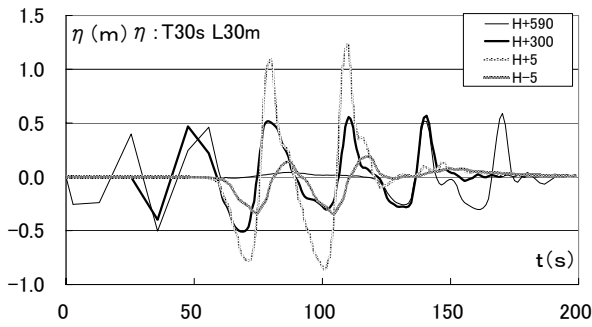


(1) 水位の変化

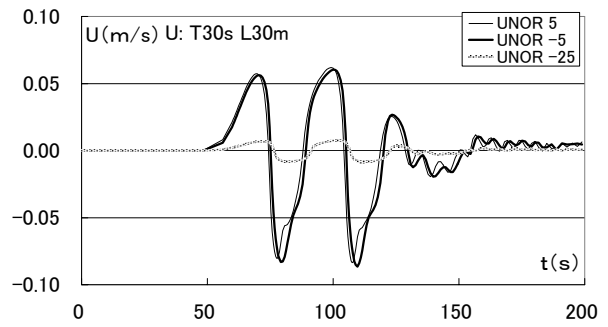


(2) 流速の変化

図-40 風波成分($T=30s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=10m$)

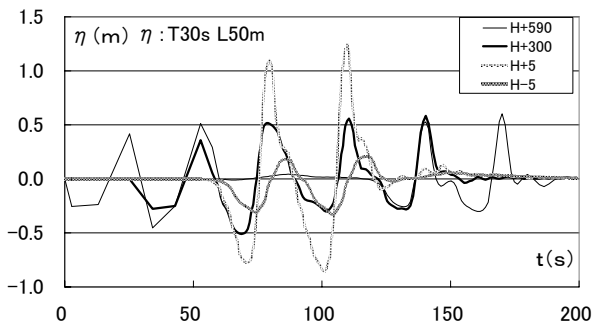


(1) 水位の変化

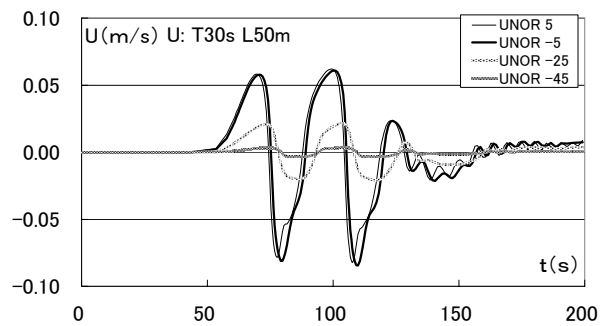


(2) 流速の変化

図-41 風波成分($T=30s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=30m$)

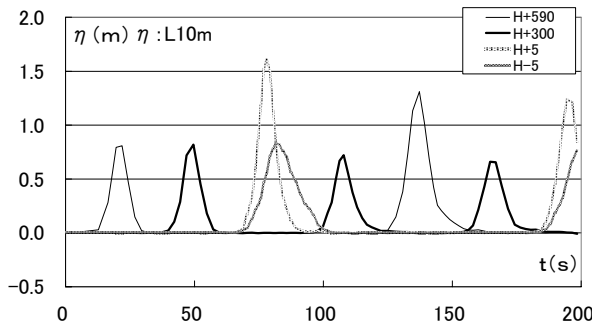


(1) 水位の変化

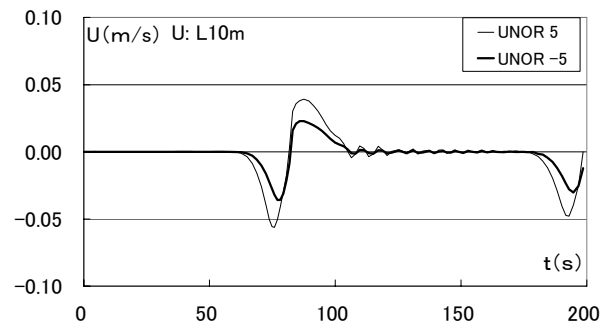


(2) 流速の変化

図-42 風波成分($T=30s$)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=50m$)

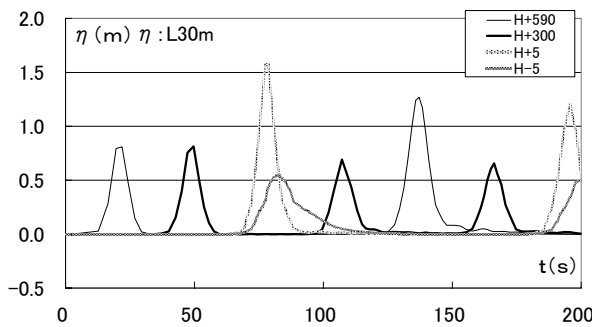


(1) 水位の変化

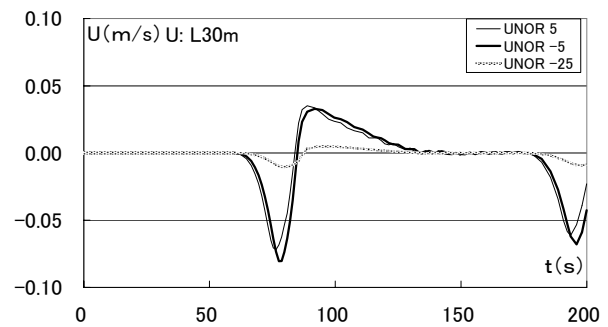


(2) 流速の変化

図-43 風波成分(孤立波)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=10m$)

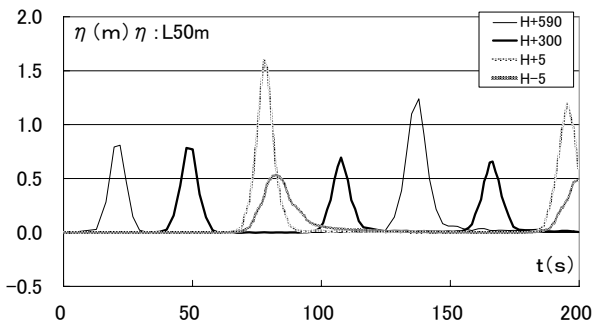


(1) 水位の変化

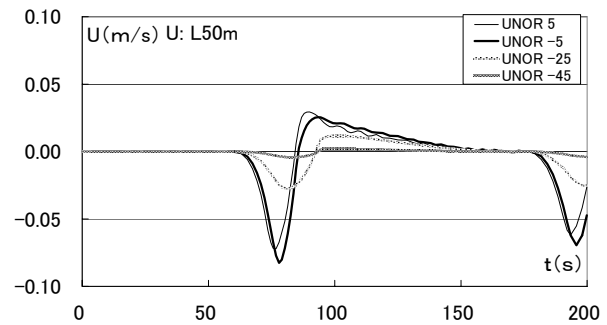


(2) 流速の変化

図-44 風波成分(孤立波)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=30m$)



(1) 水位の変化



(2) 流速の変化

図-45 風波成分(孤立波)の透水砂礫層内での水位と流速の変化 (消波層延長 $L=50\text{m}$)

消波層全域で粒径 0.31m の礫を利用しているため、長周期になるほど消波機能が得られづらくなり、 $T=30\text{s}$ 、孤立波での反射率が大きくなったと考えられる。平石(2005)が実施した解析によると、両面スリットケーソンの背後に、 $d=80\text{cm}$ の礫 25m 、 $d=40\text{cm}$ の礫 25m を設置した条件で孤立波を作用させた場合の反射率は 0.71 であり、沖側に粒径の大きな礫またはスリットケーソンを設置して、入射波を構造物の前面で反射させずに、内部まで取り込みエネルギー損失を図る方法に優位性があると判断できる。

なお、第3章の現地観測で得られた結論では、振動する流動の波高と流速から得られるエネルギー損失水頭は、*Dupuit-Forchheimer*則で近似できる損失に補正係数を掛ける必要があった。したがって、計算で得られた結論は、材料係数等を標準値で与えた場合に適応しており、現地の代表粒径の与え方や材料係数の選び方によって計算結果も変化する。今後も現地でのモニタリング結果などを考察して、適切な材料係数や損失の与え方について十分な考察を行う必要がある。

5. あとがき

ここでは、高潮対策護岸として建設中の透水砂礫層を用いて、現地における長周期の水位と流速の砂礫層内における変動を調べた。現地砂礫層の位置が東京湾内にあるので外洋の長周期波を直接観測できたわけではない。東京湾近傍を台風が通過したときに、波高 1m で周期が $10\sim 15\text{s}$ 程度のうねりが護岸前面に作用した限定した条件での解析である。主な結論を以下に示す。

- 1) 計測器設置後2つの台風が接近し、周期十数秒のうねり成分が湾内に侵入し、護岸前面でもうねりによる $10\sim 15\text{s}$ の流動が観測できた。
- 2) 施工の関係で観測器を設置した透水層の幅は 15m 程度

で、長周期波対策護岸の想定幅よりも小さく、水位の低減率は小さく、水位のスペクトルによるスペクトル密度の比からはエネルギー損失は観測できなかった。

- 3) 透水層内のうねりによる流速変動スペクトルからは、振幅比を求めたところ、 $0.7\sim 0.8$ 程度の比が観測されエネルギー低減効果が確認できた。
- 4) 流速変動から求めた現地でのエネルギーの損失水頭は、*Dupuit-Forchheimer*則で近似できる損失に補正係数を掛けることによって表すことができた。
- 5) スリットケーソン後壁のNo. 1と透水層内の観測点No. 3における水位変動と流速変化から入射分離計算で得られる反射率を求めたところ $0.9\sim 1.0$ であった。
- 6) 流体直接解析法で、十分な幅を有する透水砂礫層を対象とした計算を実施したところ、長周期波対策護岸は風波や長周期波の反射が低減できることが判った。ただし、粒径や材料係数は一定の値を用いており、現地の材質や使用できる砂礫材の粒径について今後も検討が必要である。

(2006年3月30日受付)

謝辞

現地観測機器取付に関して、関東地方整備局京浜港湾事務所の皆様から懇切なご協力を受けており、ここに、深く感謝するものである。また、現地観測においては、(株)日本海洋コンサルタントのご助力を受けた。本研究で用いた流体直接解析法の計算においては、(株)フジタ技術センターのご支援を受けた。上記の皆様方に深く感謝する次第である。さらに多大な助力を頂いた波浪研究室諸氏に心より感謝する。最後に、本研究は関東地方整備局からの受託研究の一環であることを記す。

参考文献

Hiraishi T., K. Hirayama, H. Kunisu and K. Nagase (2003): Increase of harbor operation rate by long period wave absorber, Long Wave Symposium 2003, Special Session IAHR, pp.91-100.

沿岸開発技術研究センター (2004) : 港内長周期波影響評価マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリーNo.21, 86p.

小田一記・貫上佳則・重松孝昌・真栄平宣之・綱潔之・倉田克彦(1994) : 沿岸局所水域の浄化を目的とした石積堤の最適諸元, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1106-1110.

久保田進・水口 優・堀田新太郎・竹沢三雄 (1989) : 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.120-124.

合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976) : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p.

近藤淑郎・竹田英章 (1983) : 消波構造物, 森北出版, 275p.

白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹 (1995) : 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.941-945.

富永正照・坂本忠彦(1971) : 離岸堤による波浪減殺効果の現地観測, 海岸工学論文集, 第18巻, pp.149-154.

平石哲也・田所篤博・藤崎秀可(1996) : 港湾で観測された長周期波の特性, 港湾技術研究所報告, Vol.35, No.3, pp.3-36.

平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松渕 知・藤咲秀可・清水勝義 (1997) : 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No.873, 39p.

平石哲也・宮地 豊・石井幸生・佐藤峰雄・立石健吾・松浦邦明・中井圭二・山川 真・(2001) : 発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1356-1360

平石哲也・永瀬恭一 (2002) : 流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.686-690

平石哲也・永瀬恭一 (2003) : 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.801-805

平石哲也 (2004a) : 長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算, 港空研資料, No.1093, 21p.

平石哲也 (2004b) : 長周期波対策護岸の最適化に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44, No.1, pp.23-41.

平石哲也・永瀬恭一 (2004c) : 長周期波対策護岸の最適化に関する実験, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.721-725.

記号表

B	: 碎石による消波層の長さ(m)
d	: 消波層の粒径(m)
d_{50}	: 中央粒径(m)
f	: 波の周波数(1/s)
H	: 規則波高(m)
H_I	: 入射波高(m)
H_R	: 反射波高(m)
$H_{1/3}$: 有義波高(m)
H_{max}	: 最大波高(m)
K_r	: 反射率
T	: 規則波周期(s)
$T_{1/3}$: 有義波周期(s)
T_{max}	: 最大波周期(s)
h	: 損失水頭(m, cm)
I	: 水面勾配線
I_e	: エネルギー勾配線
g	: 重力加速度(m/s ²)
t	: 時間(s)
u	: 水平流速(m/s)
Δt	: 計算時間間隔(s)
α_0	: 材料係数
β_0	: 材料係数
η	: 水位(m)
δ	: ケーソンスリット開口率
λ	: 透水層空隙率
μ	: 動粘性係数(=0.0131cm ² /s)
ρ	: 流体密度(kg/m ³)
ρ_s	: 石材の密度(kg/m ³)

港湾空港技術研究所資料 No.1130

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発 行 所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(814)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印 刷 所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright © (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。