

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 長周期うねりの特性 .....	4
3. 水理模型実験概要 .....	5
3.1 実験方法 .....	5
3.2 計測・解析方法 .....	6
4. 護岸越波特性について .....	7
4.1 直立護岸の越波特性 .....	7
4.2 消波護岸の越波特性 .....	12
4.3 透過離岸堤を有する直立護岸の越波特性 .....	14
4.4 護岸形状による越波特性の比較 .....	15
5. 護岸波圧特性について .....	18
5.1 直立護岸の波圧特性 .....	18
5.2 消波護岸の波圧特性 .....	19
5.3 透過離岸堤を有する直立護岸の波圧特性 .....	20
5.4 護岸形状による波圧特性の比較 .....	20
6. 結論 .....	20
7. あとがき .....	21
参考文献 .....	21
記号表 .....	22
付録 .....	23

# Experiments on Wave Overtopping Rate and Wave Pressure on Seawalls of Long Period Swell

Hiroaki KASHIMA\*

Katsuya HIRAYAMA\*\*

## Synopsis

Recently, coastal disasters due to swell attacks induced by heavy storms and catastrophic typhoons increase at any ports and harbors. For example, the caissons of breakwater at the Fushikitoyama Harbor were damaged by the 14.2s swell in 2008. In general, in shallow water the wave height of swell becomes larger than that of wind wave under the effects of wave shoaling and wave refraction. The wave overtopping rate and wave pressure of long period swell banded narrow spectra is different from that of wind wave because of the characteristics on the wave grouping and the wave height distribution. In the study, the model experiments were conducted to measure the wave overtopping rate and wave pressure on seawall of the long period swell and to propose the countermeasure to be able to be efficiently decreased the wave overtopping rate.

The main conclusions of the paper are as follows.

- 1) It is possible to estimate the wave overtopping rate of the long period swell by applying the existing design method with attention to the length of wave period. And the wave overtopping rate tends to increase under the effects of the swell specific wave grouping.
- 2) The maximum wave pressure of long period swell becomes larger than that of wind wave above the still water level in the surf zone.
- 3) It is possible to reduce the wave overtopping rate of long period swell by placing the permeable detached breakwater formed in concrete blocks. However, the wave pressure is not efficiently decreased above the still water level.

**Key Words:** Wave overtopping, wave pressure, long period swell, wave grouping, JONSWAP spectrum, concrete blocks

---

\* Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Department

\*\*Head, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Department

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

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:kashima@pari.go.jp

# 長周期うねりの護岸越波量および作用波圧特性に関する 実験的検討

加島 寛章\*・平山 克也\*\*

## 要 旨

2008年2月に発生した伏木富山港の防波堤滑動や護岸越波のように、近年各地で起きている港湾・海岸災害は、周期14s以上のうねり性波浪（本研究では、“長周期うねり”と呼ぶ）の来襲によるものが多い。この波浪は、風波に比べてより沖合から屈折や浅水変形が生じ、沿岸域では、より大きな波高となって護岸等に作用する。一方、長周期うねりは非常に狭帯域なスペクトルを有するため、波高分布や波群特性が通常の風波と異なり、護岸上の越波量や作用波圧に違いが生じることが懸念される。そこで本研究では、断面実験により長周期うねりの護岸越波・波圧特性を明らかにするとともに、護岸越波量を効率的に低減することが可能な対策工断面の提案を試みた。

これらの実験の結果、以下のような主要な結論が得られた。

- 1) 長周期うねりの直立護岸に対する越波量は、通常的设计波よりも周期が長いことに十分配慮すれば、既存の越波流量算定図を用いて算定することが概ね可能であることが確認された。ただし、長周期うねりに顕著な波群の影響を受けて越波量が増加する危険性があることに注意が必要である。
- 2) 長周期うねりの直立護岸に作用する最大波圧強度は、静水面より上方において大きくなる傾向にあり、その最大値は通常の風波に比べ、砕波帯内において2~4倍程度大きいことがわかった。
- 3) 護岸天端高を相対的に嵩上げする効果を発揮する消波ブロック被覆工の代わりに、これとほぼ同等の断面積を有する離岸堤を直立護岸の前面に設置することにより、長周期うねりの護岸越波量を直立護岸に比べて概ね10%以下まで低減させる効果が期待できることが確認された。ただし、この断面は直立護岸を直接防護する機能を有していないため、静水面より上方において発生する局所的な波圧に対して低減効果が十分発揮されない場合がある。

キーワード：越波，波圧，長周期うねり，波群，JONSWAP型スペクトル，消波ブロック

---

\* 海洋・水工部海洋研究領域海洋研究チーム研究官

\*\* 海洋・水工部海洋研究領域海洋研究チームリーダー  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:kashima@pari.go.jp

## 1. まえがき

近年、地球温暖化の影響によると思われる台風の経路変化や大型化に伴い、我が国沿岸において大規模な被害が多発している。たとえば、2006年9月に発生した岩手県久慈港護岸の越波災害や2007年9月に発生した神奈川県西湘海岸の護岸崩壊、さらに、2008年2月に発生した伏木富山港の防波堤滑動被災は、設計波に比べて波高は小さいものの、それぞれ周期14s程度のうねり性波浪が来襲したことが原因とされている。本論文では、平石ら(2008)にならい、設計波に比べて波高が小さいものの、周期が長いために大きな外力をもたらす波浪を偶発波浪の1つとして捉え、“長周期うねり”と呼ぶことにする。

一般に、この波浪は、風波に比べてより水深の深い沖から屈折や浅水変形が生じ、波形勾配が小さく砕波しにくいいため、浅瀬や海岸上ではより大きな波高となって防波堤や護岸に作用する。また、このような長周期うねりは狭帯域にエネルギーが極端に集中するようなスペクトルを有するため、波高分布や波群特性が風波とは異なり、護岸上の不規則波の越波量や作用波圧にも違いが生じることが懸念される。たとえば、護岸に対する越波流量について、水理模型実験の結果に基づいて作成された越波流量算定図(合田, 1975)やこれを定式化した越波流量算定近似式(高山, 1982)を適用することにより護岸越波流量が算定される。しかしながら、これらの算定方法のもとになった作用波は風波であり、長周期うねりに対する適用性については現時点では不明である。また、これらの算定方法では、護岸越波量に影響を及ぼす護岸前面における水位上昇やサーフビートなどの長周期変動の影響もある程度適切に考慮されていると考えられるが、長周期変動の影響が顕著となる長周期うねりに対し、護岸越波量を小さめに見積もってしまう可能性がある。

そこで本研究では、35m断面水路内に風波および長周期うねりを想定した不規則波浪を造波し、長周期うねりの護岸越波・波圧特性を明らかにするとともに、長周期うねりの護岸越波量や作用波圧の低減効果を発揮しうる対策工断面の提案を試みた。

## 2. 長周期うねりの特性

沖で発生した周期14s程度の長周期うねりは、通常の風波と異なり、水深のより深い沖から海底地形の影響を受けて屈折や浅水変形を伴いながら沿岸域に伝播し、高波浪となって越波災害や小型船舶の転覆事故等を引き起こす可能性がある。たとえば、東京湾口に面した久里浜湾

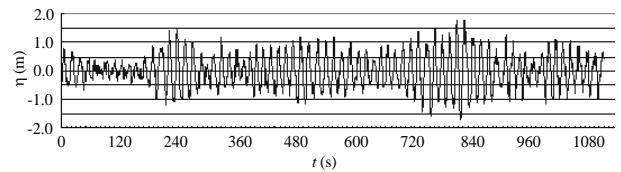


図-2.1 久里浜湾(アシカ島)で観測された長周期うねりの水面波形

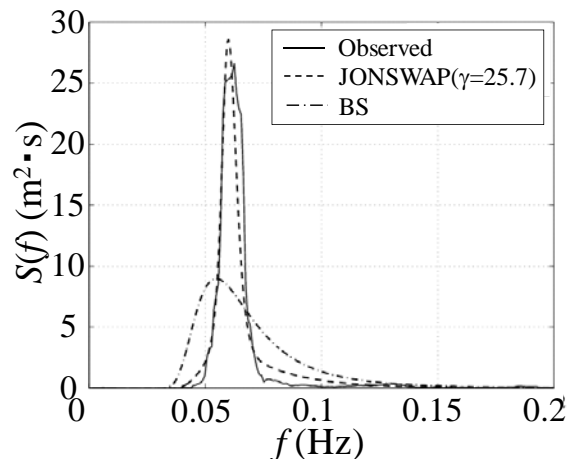


図-2.2 久里浜湾(アシカ島)で観測された長周期うねりの周波数スペクトル ( $H_{1/3}=2.24\text{m}$ ,  $T_{1/3}=16.7\text{s}$ )

では、2004年に発生した台風2号が関東地方のはるか沖を通過した後に、晴天であるにもかかわらず、長周期うねりの来襲により小型船舶の転覆事故が発生した。この時に久里浜湾内のアシカ島において観測された長周期うねりの水面波形を図-2.1に示す。なお、縦軸は水面変位である。この図より、包絡波形を伴う高波の連なり現象が明瞭に現れていることがわかる。

このような水面波形から推定される周波数スペクトルは、ある特定の周波数帯に波エネルギーが極端に集中するJONSWAP型スペクトルで近似できる(平山ら, 2009)。図-2.2に上述した久里浜湾で観測された長周期うねりの周波数スペクトルを示す。実線は観測されたスペクトルであり、破線および一点鎖線はそれぞれ観測された有義値に対するJONSWAP型スペクトルおよびブレットシュナイダー・光易型スペクトルである。ここで、JONSWAP型スペクトルの尖鋭度は $\gamma=25.7$ である。この図より、長周期うねりの周波数スペクトルは、港湾設計等で採用されているブレットシュナイダー・光易型スペクトルに比べ、ピークの尖った形状をしていることがわかる。すなわち、長周期うねりは、スペクトル尖鋭度を適切に設定したJONSWAP型スペクトルで表現することが可能である。ただし、平山ら(2009)によると、このように特異な $\gamma$ 値が

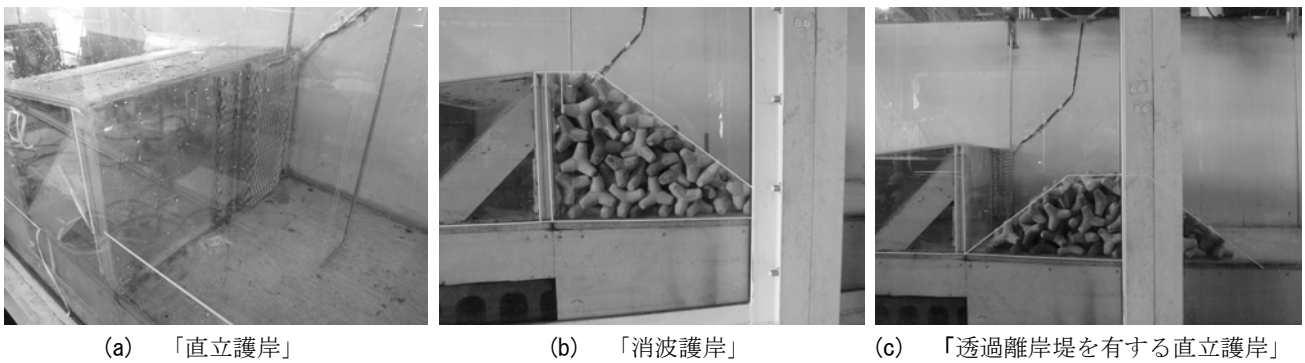


写真-3.1 実験模型

推定された原因は、観測点であるアシカ島周辺の急峻な地形特性に伴う屈折により、長周期うねりの成分波が選別されたことによるものであると指摘している。一方、アシカ島沖に位置する伊豆大島の波浮港で観測した周波数スペクトルや久慈港の越波災害を引き起こした長周期うねりを観測した常陸那珂港のデータでは、長周期うねりの周波数スペクトルは、 $\gamma=4.0$ 程度としたJONSWAP型スペクトルで近似できることが確認されている。

このように、長周期うねりは、通常の風波に比べて単に周期が長い波だけでなく、非常に長い距離を伝播する過程で成分波が選別され、波向きの一方向化と周波数の狭帯域化が進んだ結果、浅海域において、風波とは異なる伝播・変形特性を有すると考えられる。

### 3. 水理模型実験概要

長周期うねりの護岸に対する越波・波圧特性を解明するため、長さ35mの断面水路を用いた水理模型実験を実施した。以下に、実験方法および計測・解析方法について述べる。

#### 3.1 実験方法

水理模型実験では、勾配1/30の海底勾配および護岸模型が設置された長さ35m、幅0.6m、深さ1.3mの片面ガラス張りの断面水路内に通常の風波および長周期うねりを想定した不規則波群を造波し、それらに対する護岸背後への越波量や護岸に作用する波圧強度の計測を行った。なお、模型縮尺は1/40とし、特に断らない限り、以下では現地量で表記する。

実験に用いた不規則波群は、入射波周期 ( $T_{1/3}$ ) が8.0s, 14.0s, 17.0sのJONSWAP型スペクトルを有する不規則波群とし、通常の風波を想定した8.0sでは $\gamma=1.0$ 、長周期うねりを想定した14.0sおよび17.0sでは、スペクトル尖鋭度によ

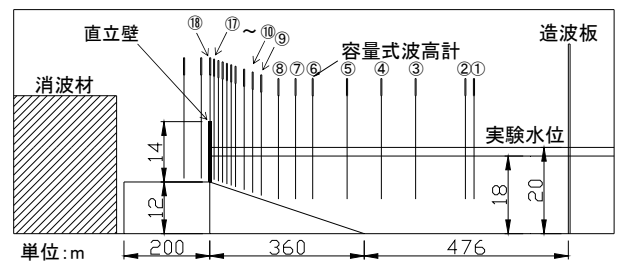
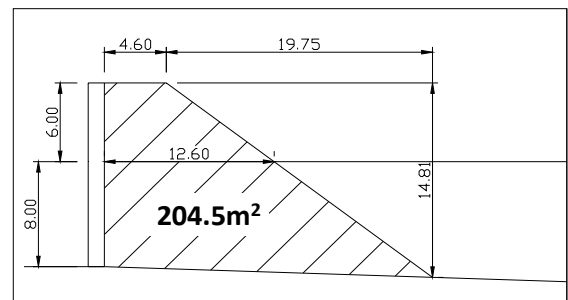
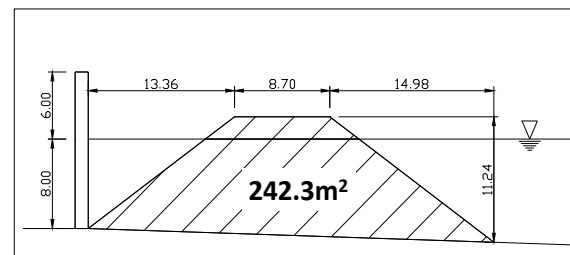


図-3.1 波高計（図中の数字）および直立壁の設置位置



(a) 「消波護岸」



(b) 「透過離岸堤を有する直立護岸」

図-3.2 各護岸の消波ブロック断面

る違いが明瞭となるように $\gamma=1.0, 10.0$ とした。なお、 $\gamma=1.0$ のJONSWAP型スペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルに相当する。入射波高は、直立壁や斜面模型がない状態で、直立壁の設置位置に相当する位置における有義波高 ( $H_{toe}$ ) が4.0mとなるように調節を行

表-3.1 実験ケース表

護岸形状	$h_{off}$ (m)	$h_{toe}$ (m)	$h_c$ (m)	$H_{toe}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$\gamma$	$H_0$ (m)	$H_0/L_0$	護岸前面水位 計測の有無	短時間越波量 計測の有無
直立護岸	20.0	8.0	6.0	4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	○
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	○
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	○
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	○	○
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
	18.0	6.0	8.0	4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	○
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	○
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	○
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	○	○
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
消波護岸	20.0	8.0	6.0	4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	○
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	○
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	○	×
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	×	×
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	×
	18.0	6.0	8.0	4.0	14.0	10	4.08	0.013	×	×
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	×
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	×	×
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	○
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	○
透過離岸堤を有する直立護岸	20.0	8.0	6.0	4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	○
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	○
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	○
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	○
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	○	×
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	×
	18.0	6.0	8.0	4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	×
				4.0	17.0	1	3.83	0.008	○	×
				4.0	14.0	10	4.08	0.013	○	×
				4.0	14.0	1	4.08	0.013	○	×
				4.0	8.0	1	4.36	0.044	○	×
				4.0	17.0	10	3.83	0.008	○	×

った。また、波の不規則性を確保するため、それぞれの入射波に対して初期乱数を変えて異なる3種類の波群特性を有するものを設定した。換算沖波波高 ( $H_0'$ ) は、入射波高を造波板前面の一樣水深部の水深 (以下では、実験水深 ( $h_{off}$ ) と表記する。) に対応する浅水係数で割り戻して算出した。ここで、浅水係数 ( $K_s$ ) は首藤 (1974) の理論に基づく非線形浅水係数を採用した。実験水深 ( $h_{off}$ ) は、20.0および18.0mの2種類とし、護岸天端高 ( $h_c$ ) は、実験水深に対応づけてそれぞれ6.0および8.0m (護岸前面水深 ( $h_{toe}$ ) は8.0および6.0m) とした。

対象護岸の断面形状は、「直立護岸」、「消波護岸」のほか、越波低減機能を発揮しうる対策断面として提案する「消波ブロックで形成される透過離岸堤を直立護岸より少し沖合に配置した護岸 (=透過離岸堤を有する直立護岸)」を設定した (写真-3.1および図-3.1, 図-3.2)。表-3.1に上記の実験条件をまとめたものを示す。

計測時間は、計測波数 ( $N_{wave}$ ) が各ケースの平均周期 ( $T_{bar}$ ) に対して250波程度となるように設定した。また、サンプリング時間間隔 ( $dt$ ) も平均周期に応じて設定した。ただし、波圧特性実験では、直立護岸に作用する衝撃的な波圧の計測が可能となるように、サンプリング時間間隔の分解能を可能な限り細かく設定した。表-3.2に上記の計測条件をまとめたものを示す。

### 3.2 計測・解析方法

越波特性実験では、写真-3.2に示すような直立護岸背後の水平床部に設置された越波水塊集水ますに溜まった越波水塊の総量を計測し、計測時間による時間平均操作

表-3.2 計測条件表

実験種類	$T_{1/3}$ (s)	$T_{bar}$ (s)	$dt$ (s)	$N_{data}$	$t$ (s)	$N_{wave}$
越波特性	8.0	6.7	0.253	8192	2072.6	311
	14.0	11.7	0.379	8192	3104.8	266
	17.0	14.2	0.443	8192	3629.1	256
波圧特性	8.0	6.7	0.025	65536	1638.4	246
	14.0	11.7	0.051	65536	3342.3	286
	17.0	14.2	0.063	65536	4128.8	291

(注)  $N_{data}$  : 計測データ数,  $t$  : 計測時間

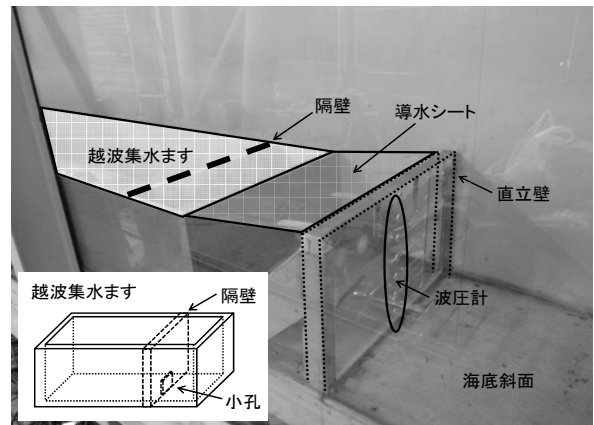


写真-3.2 越波集水ますと波圧計の設置状況

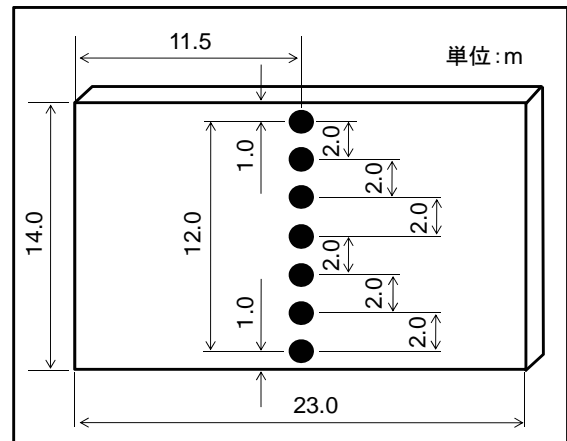


図-3.3 波圧計の取り付け位置 (●: 波圧計)

を施して作用波に対する護岸背後への時間平均越波流量 ( $q_{EXP}$ ) を算出した。また、越波水塊集水ます内の小孔を設けた隔壁背後の水面変位を計測することにより、短時間越波流量も同時に計測した。ただし、護岸越波流量が非常に小さい場合や護岸前面水位の計測が困難な場合には短時間越波流量を計測していない (表-3.1)。

波圧特性実験では、写真-3.2および図-3.3に示すように直立壁の中央部に鉛直方向に等間隔で7か所に取り付けた波圧計により、直立護岸に作用する波圧強度を計測

した。解析では、計測された波圧強度の時間最大値（最大波圧強度： $p_{max}$ ）を算出した。

#### 4. 護岸越波特性について

##### 4.1 直立護岸の越波特性

###### (1) 時間平均越波流量

図-4.1 に、「直立護岸」に対する護岸越波流量の周期による変化について、護岸天端高およびスペクトル尖鋭度ごとに示す。図の縦軸は、換算沖波波高で無次元化した護岸越波流量であり、3 波群の平均値を表している。周期と護岸越波流量の関係は、容易に予測されるように、周期が長くなると護岸越波流量が増大する。また、護岸天端高が低くなれば、越波しやすい状況になるため、いずれの周期に対しても一様に護岸越波流量が増大している。さらに、スペクトル尖鋭度と護岸越波流量の関係をみると、同一周期において、スペクトル尖鋭度が大きいほど、護岸越波流量が増大する傾向にある。特に、周期 17.0s のケースに比べて周期 14.0s のケースにおいて、この傾向が顕著に現れている。なお、今回の実験においては、周期 8.0s のケースは通常の風波と考えられるため、スペクトル尖鋭度は $\gamma=1.0$ のみとし、尖鋭度の違いは考慮していない。

###### a) スペクトル尖鋭度と護岸越波流量の関係

一般に、スペクトル尖鋭度が大きい長周期うねりでは、ある周波数帯の成分波のエネルギーが高いため、その波形は、個々の波の周期が互いに近く、振幅が緩やかに変化する形となる。すなわち、波群が形成されやすくなる。さらに、このような波群性波浪では、成分波間の干渉により波群に拘束された長周期波が発生する（たとえば、Sand, 1982）。この長周期波の拘束の一部が護岸前面付近での碎波や護岸壁面での反射等により解放され、自由波を含んだ長周期変動が発生する。したがって、護岸前面でこのようにして発生した長周期変動と来襲波の位相が一致するときには、護岸越波流量が増大する危険性がある。すなわち、長周期変動の有無が護岸越波流量に大きな影響を与えることが推察される（たとえば、佐藤ら, 1998 ; 1999）。一方、越波現象は波の波頂面が護岸天端高を超えることにより生じる現象であるため、直立護岸前面における波による水位変動（クレスト振幅や波高）が重要となる。本実験では、直立護岸前面に 1/30 勾配の海底斜面が設置されているため、沖から伝播した波はこの斜面上の浅水効果により波長が短縮され、波高が増大する傾向にある。

そこで、以上の 2 つの観点（水面の長周期変動、波に

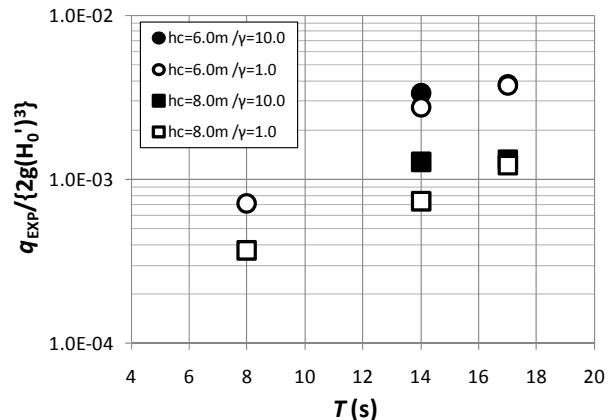
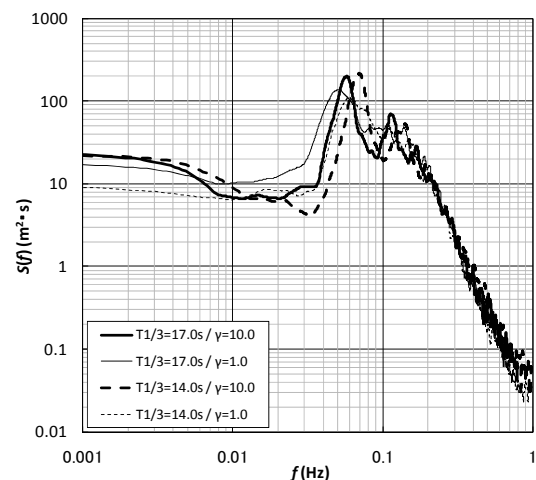
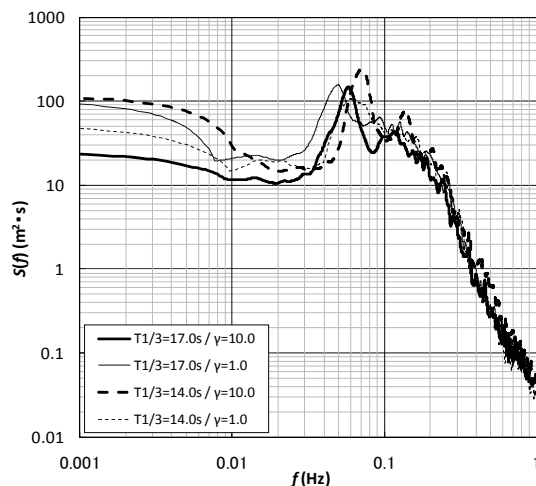


図-4.1 「直立護岸」における護岸越波流量



(a) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0m$ )



(b) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0m$ )

図-4.2 直立護岸前面における周波数スペクトル

よる水位変動) からスペクトル尖鋭度と護岸越波流量の関係について整理した。

図-4.2 に示すのは、直立護岸前面の水面変動から算出

した周波数スペクトルである。これらの図より、特に周期 14.0s のケースにおいて、スペクトル尖鋭度が大きいほど長周期変動成分のエネルギーが大きいことがわかる。ただし、周期 17.0s のケースにおいてこの関係が逆転している原因は、現段階において不明である。また、この傾向は、護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ ) ほど顕著である。これは、護岸天端高が高くなったことにより直立護岸を越える水塊量が少なくなり、その越波量に相当する分の波エネルギーが減衰されず、造波板と直立護岸の間に滞留することになったためと考えられる。これらの関係より、少なくとも周期 14.0s のケースでは、スペクトル尖鋭度が大きい場合に、水面の長周期変動成分のエネルギーが大きくなるため、来襲波と長周期変動の位相が一致する場合には、護岸越波流量が増大することが考えられる。

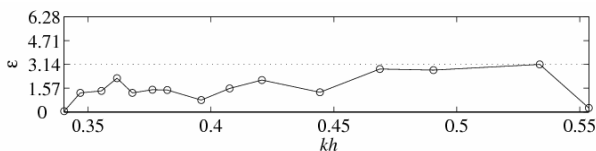
そこで、来襲波と長周期変動の位相関係を調べるため、沖から護岸前面までの各計測地点の水位変動データに対し、来襲波の包絡波形 ( $A$ ) と長周期変動水位 ( $\zeta$ ) の相互相関係数について整理した。ここでは、List (1991) と同様の手法を用いて来襲波の包絡波形を算出し、Janssen ら (2003) と同様に、式 (1) により任意の計測地点における包絡波形の 2 乗値  $A^2$  と同地点における長周

期変動水位の相互相関係数 ( $R$ ) を算出した。

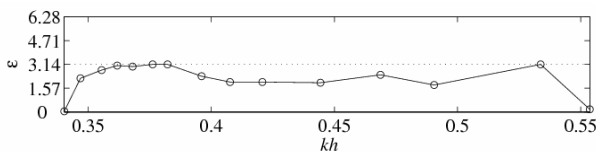
$$R(\tau) = \langle A^2(t)\zeta(t+\tau) \rangle / \sigma_{A^2}\sigma_{\zeta} \quad (1)$$

ここで、 $\langle \rangle$  は時間  $t$  に対する平均値、 $\sigma_{A^2}$  および  $\sigma_{\zeta}$  はそれぞれ包絡波形の 2 乗値および長周期変動水位の標準偏差である。

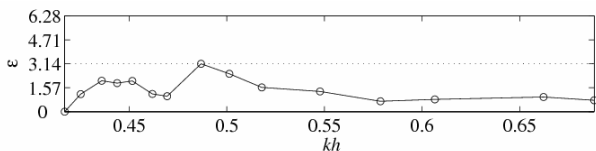
図 4.3 に、来襲波の包絡波形と長周期変動水位の位相差の空間分布を示す。図の横軸は波数を水深で無次元化した相対水深であり、縦軸は式 (1) で算出した相互相関係数が最大となる時間差  $\tau$  を長周期変動の有義波周期で無次元化した位相差 ( $\varepsilon$ ) である。なお、この位相差を算出するために使用した両波形と来襲波の波形を付録に示す。これらの図より、護岸天端高やスペクトル尖鋭度にかかわらず、包絡波形と長周期変動の波形の位相差は、沖から護岸にかけては  $\varepsilon=0\sim\pi$  で変動しているものの、直立護岸前面 (各図の左端) において  $\varepsilon=0$ 、すなわち、包絡波形と長周期変動の水位波形の位相の一致が確認された。一方、田島ら (2009) の実験結果によると、包絡波形と長周期変動の位相関係は、沖から岸に向かって両波形の位相差が徐々に小さくなる傾向にある。しかしながら、本実験結果では、必ずしもそのような傾向は確認できなかった。これは、田島ら (2009) の実験では、反射波を



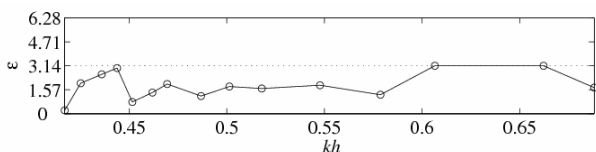
(a) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



(b) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

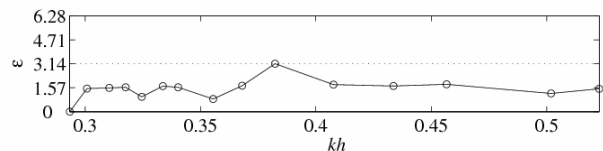


(c) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

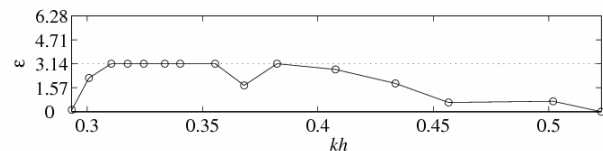


(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$

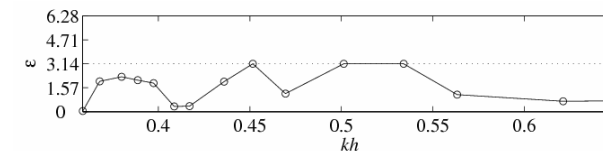
(1) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )



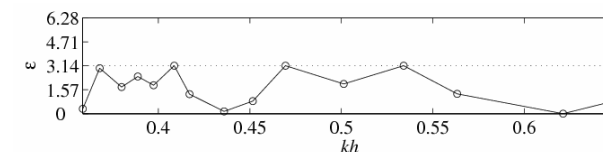
(a) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



(b) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$



(c) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

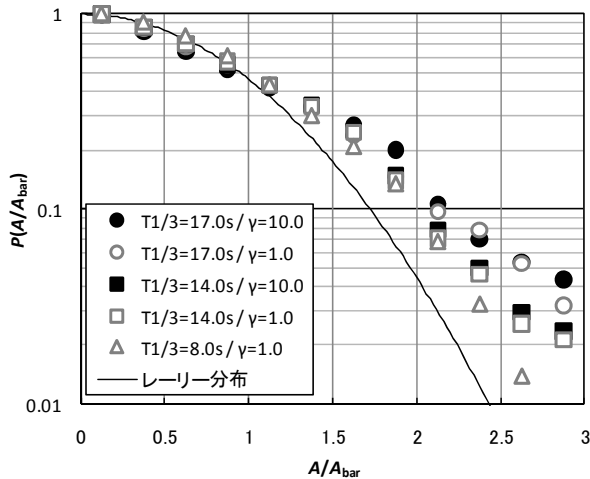


(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$

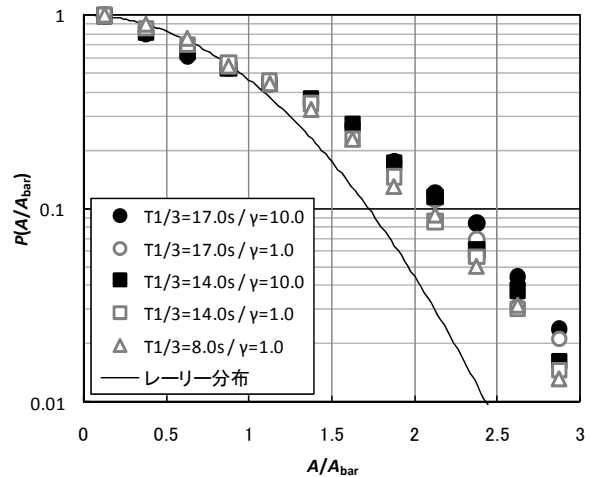
(2) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )

図-4.3 来襲波の包絡波形と長周期変動の位相関係





(a) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )



(b) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )

図-4.4 直立護岸前面におけるクレスト振幅の確率密度分布

取り除いた進行波のみを対象としているのに対し、本実験では反射波を含んだ計測波形を対象としていることが原因の1つと考えられる。すなわち、本解析における長周期変動は、来襲波の波群に拘束された長周期波のほかに、護岸壁面での反射等によりその拘束の一部が解放された自由波を含んでいると考えられる。

以上より、少なくとも周期 14.0s のケースでは、スペクトル尖鋭度が大きい場合に、水面の長周期変動成分のエネルギーが大きくなり、その長周期変動と来襲波の位相の一致により、護岸越波流量が増大したものと推測される。

一方、図-4.4 に、直立護岸前面において計測された水面波形のクレスト振幅の超過確率分布（クレスト振幅がその平均値をどれくらいの確率で超えるか）を示す。図中に合わせて示したレイリー分布による超過確率と比較すると、実験値はレイリー分布よりも右側、すなわち大きなクレスト振幅の出現する確率が高くなる側（危険側）にずれていることがわかる。これは、より波峯の切り立った波形が計測されたことを意味しており、護岸前面に設置した海底斜面による浅水効果が顕著に表れたためと考えられる。さらに、実験結果では、護岸天端高にかかわらず、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きいほど、超過確率（大きなクレスト振幅の出現する確率）、すなわち護岸前面の水位の高くなる確率が大きくなる。

以上より、図-4.1 に示す実験結果は、概ね以下のように考察される。護岸天端高が高い場合には、周期 14.0s のケースにおいてスペクトル尖鋭度が大きくなると、大きなクレスト振幅（波による大きな水位変動）の出現確率が大きくなるとともに、顕著な長周期変動が発生し、

来襲波と長周期変動の位相が一致することにより、護岸越波流量が増大する。一方、周期 17.0s のケースでは、周期 14.0s の場合と同様に、スペクトル尖鋭度の増加とともに大きなクレスト振幅の出現確率は大きく、来襲波と長周期変動の位相が一致するものの、少なくとも今回の実験結果では水面の長周期変動が小さくなるため、これらの影響が相殺され、スペクトル尖鋭度による護岸越波流量に顕著な違いが表れなかったものと考えられる。また、護岸天端高が低い場合にも、いずれの周期においても、スペクトル尖鋭度の増加とともに大きなクレスト振幅の出現確率は大きくなる。しかし、護岸天端高が高い場合に比べて水面の長周期変動の影響が小さいため、スペクトル尖鋭度による護岸越波流量に顕著な違いが表れなかったものと考えられる。

これらのことから、特に、護岸越波流量が比較的小さい場合には、スペクトル尖鋭度の増加は越波流量の増大に直結する。また、これは、特に、後述する1波毎の越波流量（短時間越波流量）に対して大きく影響するため、注意が必要である。

#### b) 既存の越波流量推定値との比較

次に、今回得られた実験値の妥当性を確認するため、港湾設計等で採用されている既存の越波流量算定図（合田, 1975）による算定値と比較した結果を図-4.5 に示す。この図より、越波量が少なかった護岸天端高の高い一部のケースを除き、周期が長くなるにつれて、実験値と算定値との比が 1.0 倍から次第に大きくなるものの、概ね 1.5 倍以内（算定誤差範囲内）に収まっている。この原因の1つには、この算定図の作成に用いられた実験結果は、いずれもブレットシュナイダー・光易型スペクトルを有

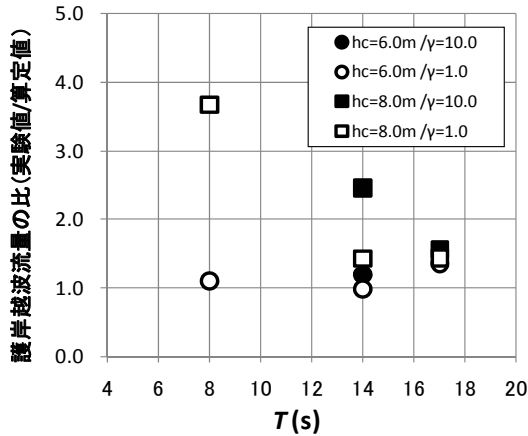


図-4.5 実験値と算定値による護岸越波流量の比較

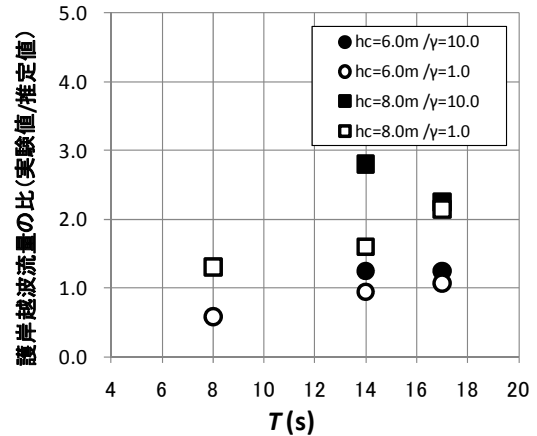


図-4.6 実験値と推定値による護岸越波流量の比較

する波浪に対する護岸越波流量であったため、波群に伴う水面の長周期変動の影響は加味されているものと考えられるものの、そのスペクトル尖鋭度による違いは考慮されていないことが挙げられる。

なお、スペクトル尖鋭度によるこれらの護岸越波流量の違いを $\gamma=1.0$ のケースにおける護岸前面水深の変化に換算すると、 $\gamma=10.0$ の時の周期14.0s, 17.0sに対する護岸越波流量は、護岸天端高が低い場合( $h_c=6.0\text{m}$ )ではそれぞれ0.6m, 1.7m, 高い場合( $h_c=8.0\text{m}$ )ではそれぞれ0.4m, 0.9mだけ潮位が上昇したことに相当する。一方、高波の連なりの来襲時の長周期変動による水位上昇量は平均的に前者で0.07, 0.17m, 後方で0.36, 0.54mであった。したがって、 $\gamma=10.0$ のケースにおける護岸越波流量の増加は、長周期変動成分による水位上昇の効果だけでは説明ができず、これに高波の連なりの位相が重畳することによって生じている可能性が高いことがわかった。

このように、スペクトル尖鋭度の大きい長周期うねりであっても、通常的设计波よりも周期が長いことに十分配慮すれば、長周期うねりに対する護岸越波流量は、既存の越波流量算定図を用いて算定することが概ね可能であることがわかった。しかしながら、スペクトル尖鋭度の増加とともに、護岸越波流量は算定値よりもやや大きめ(今回の実験条件では約1.5倍)の値をとる傾向にあることに注意が必要である。

一方、図-4.6に示すのは、前述の越波流量算定図に用いられた実験データに加え、近年ヨーロッパ各国において取得された数多くの観測・実験データを整理して得られた、新たな越波流量推定式(合田, 2008)による推定値と今回の実験値を比較したものである。この越波流量推定式は式(2)のように定義され、換算沖波波高をパラメータとする既存の越波流量推定図と異なり、護岸前面波高がパラメータとなっていることが特徴である。すな

わち、新たな越波流量推定式は、伝播過程における波浪変形を直接的に考慮した形の越波流量推定法であるといえる。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{toe}^3}} = \exp \left\{ - \left[ \left( A + B \frac{h_c}{H_{toe}} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、式中の係数A, Bは以下の式(3)および式(4)で求められる値である。ただし、 $0 \leq h/H_{toe} \leq 6$ である。

$$A = 3.4 \tanh \left\{ \begin{array}{l} (0.956 + 4.44 \tan \theta) \\ * \left[ h/H_{toe} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta \right] \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$B = 2.3 \tanh \left\{ \begin{array}{l} (0.822 + 2.22 \tan \theta) \\ * \left[ h/H_{toe} + 0.578 - 2.22 \tan \theta \right] \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\tan \theta$ は海底勾配である。

図より、護岸天端高が高い場合では、護岸越波流量が小さくなるほど越波流量の推定誤差が大きくなることに注意が必要であるものの、実験値と算定値の比は護岸天端高が低い場合も含め、概ね2.0倍程度に収まっている。また、既存の越波流量推定図に対する結果と同様に、いずれの護岸天端高でも、同一周期に対してスペクトル尖鋭度が大きくなると、実験値と算定値の比も増大する傾向が確認できる。

このように、長周期うねりに対する護岸越波流量は、近年得られた数多くの観測・実験データを整理して提案された新たな護岸越波流量推定式によっても、既存の越波流量推定図と同程度の精度で推定できることがわかった。ただし、この推定式の作成に用いられた数多くの観測・実験データについて、その作用波のスペクトル尖鋭度は必ずしも明確ではない。

## (2) 短時間越波流量

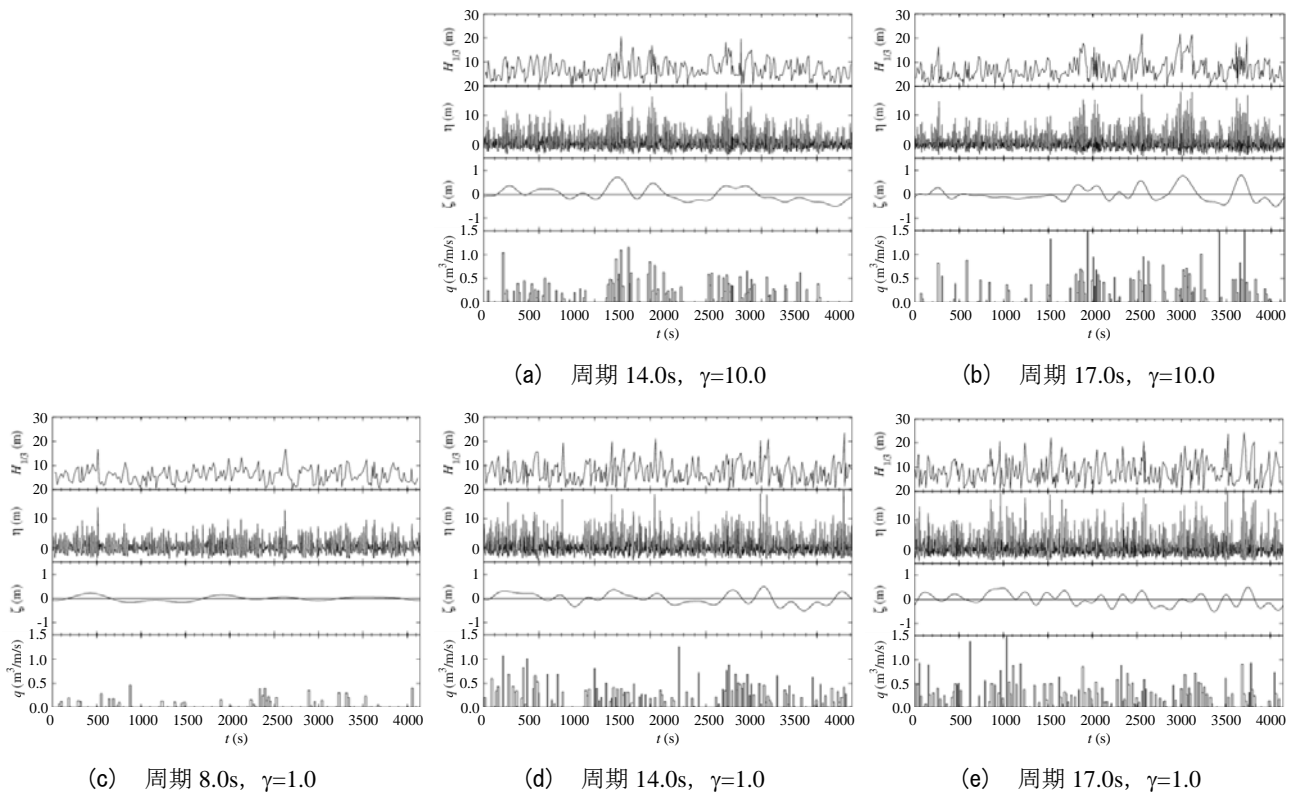
護岸や堤防の天端高の設計では、単なる時間平均越波流量だけを評価対象とするのではなく、不規則波の波群特性や短時間越波流量を考慮することが非常に重要である。(関本ら, 1992)。さらに、最近の越波災害を見ても、越波総量だけでなく、短時間における大きな1波や高波の連なりの来襲による過度の越波が発生して壊滅的な被害に至る場合が多い。たとえば、井上ら(1989)は、不規則波浪の1波毎の越波量を測定することにより、短時間越波流量が平均越波流量の5~10倍、条件によっては20倍程度にも達することを明らかにし、不規則波の波群特性や短時間越波流量の重要性を指摘している。そこで、ここでは、護岸前面で計測した水位変動の波群特性と短時間越波流量の関係について整理した。

図-4.7に示すのは、波群特性と短時間越波流量の関係であり、各図の上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量を表している。まず、護岸前面波高および水位変動をみると、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きくなるほど、波群の形成や高波高の波の連なりを確認することができる。また、長周期変動および短時間越波流量を合わせて考えると、スペクトル尖鋭度が大きい場合には、波群の形成

が確認された時期に顕著な長周期変動が発生し、その水位上昇時と高波の連なりの位相が一致する時間帯に短時間越波流量が増大している。なお、スペクトル尖鋭度が小さい場合にも同様に、長周期変動の卓越時期に短時間越波流量の増大を確認することができるが、その程度は小さい。一方、周期8.0sのケースでは、波群の形成やそれに伴う顕著な長周期変動は確認されず、短時間越波流量は小さい。

図-4.8に最大短時間越波流量と平均越波流量の比率を示す。この図より、護岸天端高にかかわらず、スペクトル尖鋭度が小さい場合には、周期によらず、最大越波流量と平均越波流量の比(平均値)は概ね3.5~4.5倍であるのに対し、スペクトル尖鋭度が大きい周期14.0s、17.0sの場合では、3.8~6.5倍となり、波群による長周期変動や高波の連なりの影響を強く受けて短時間越波流量が増加することが確認できる。

このように、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きい波浪(長周期うねり)が護岸に来襲する場合には、数十分間の平均的な越波量だけでなく、短時間に集中して発生する越波量に対しても、護岸背後の安全性を十分に確保しうる護岸設計が求められる。



(1) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )

図-4.7 波群特性と短時間越波流量の関係:「直立護岸」

(上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量)

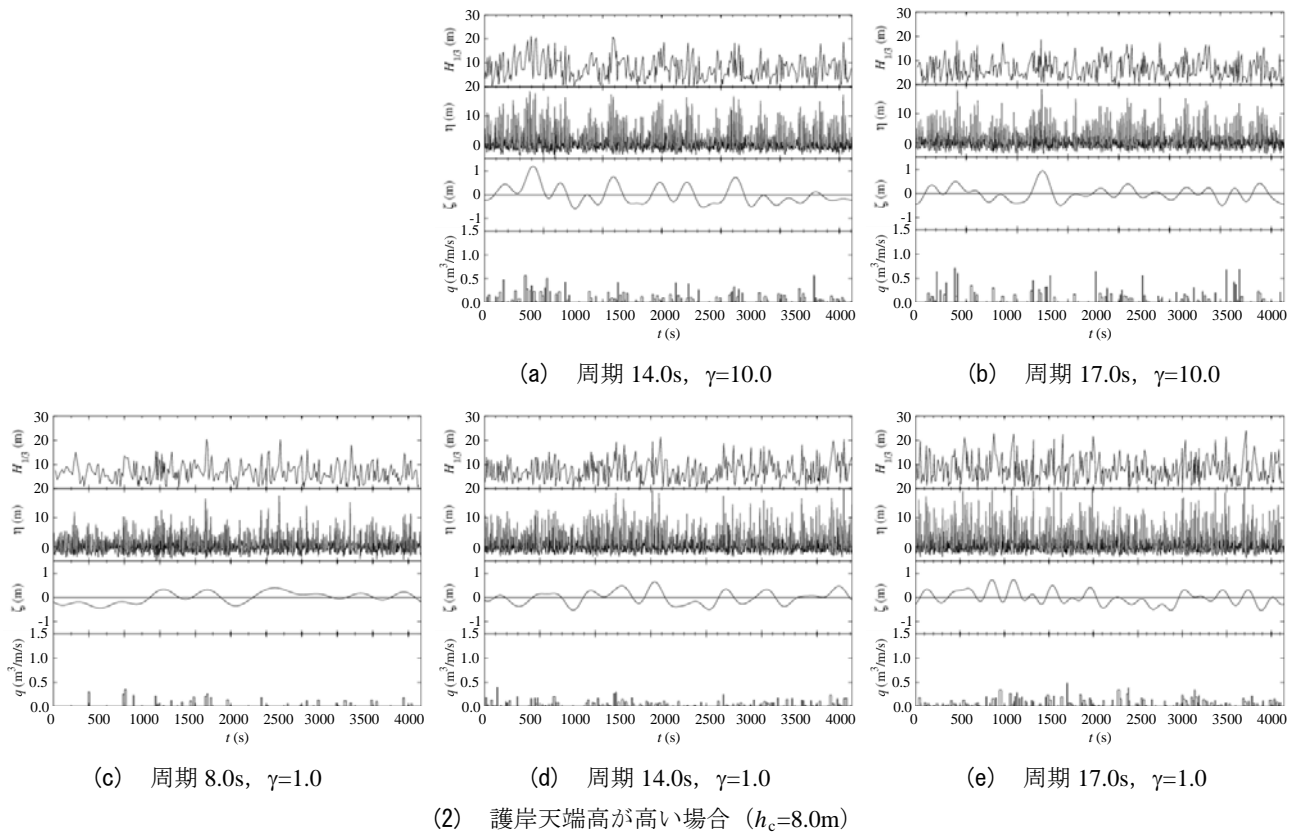


図-4.7 波群特性と短時間越波流量の関係：「直立護岸」(続き)

(上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量)

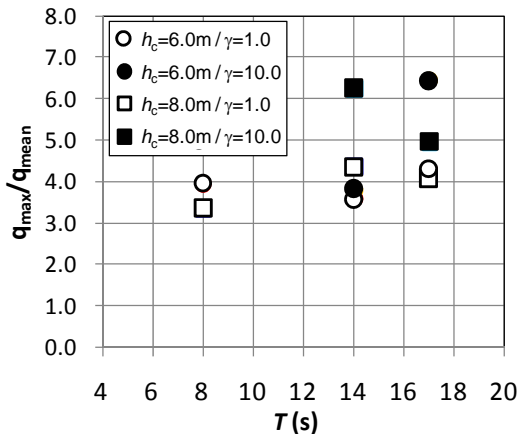


図-4.8 最大短時間越波流量と時間平均越波流量の比

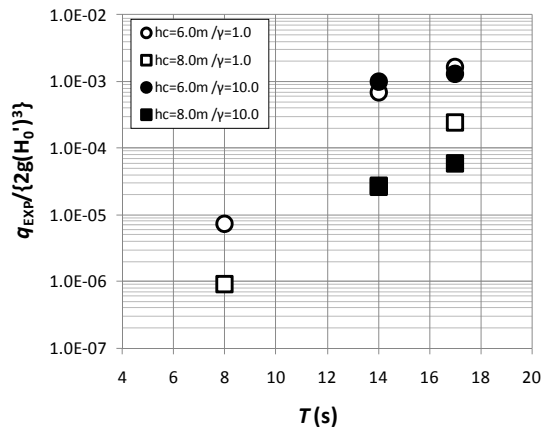


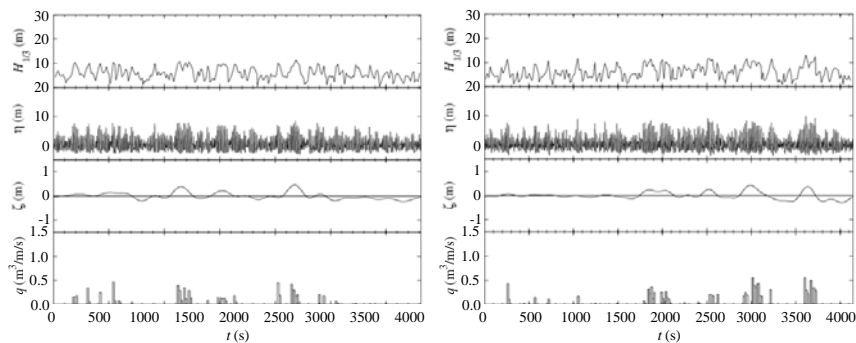
図-4.9 「消波護岸」における護岸越波流量

## 4.2 消波護岸の越波特性

### (1) 時間平均越波流量

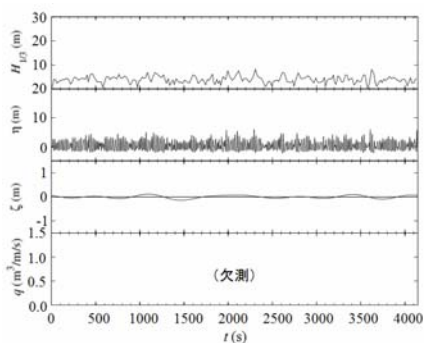
図-4.9 に、「消波護岸」に対する護岸越波流量の周期による変化について、護岸天端高およびスペクトル尖鋭度ごとに示す。図の説明は、「直立護岸」の場合と同じである。「直立護岸」の場合と同様に、周期が長く、護岸天端高が低くなるほど、護岸越波流量が増大する傾向にあ

る。また、護岸天端高にかかわらず、周期 14.0s のケースではスペクトル尖鋭度が大きいほど護岸越波流量が大きいものの、周期 17.0s のケースでは、この関係は逆転している。これらの関係は、「直立護岸」において考察したように、水面の長周期変動と高波高の出現確率の2つの観点に着目して整理することができる。

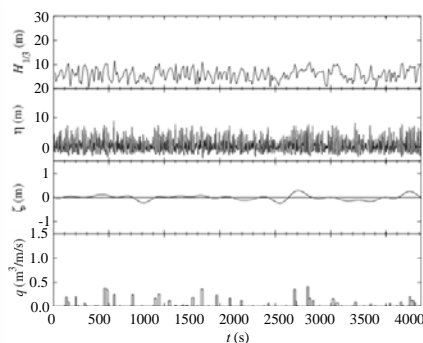


(a) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

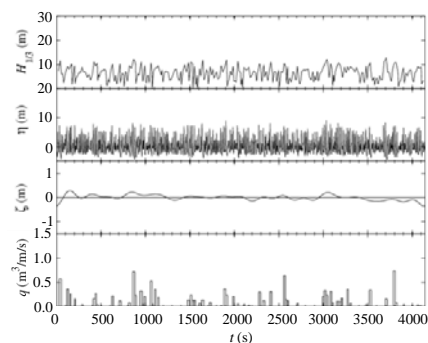
(b) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



(c) 周期 8.0s,  $\gamma=1.0$



(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$



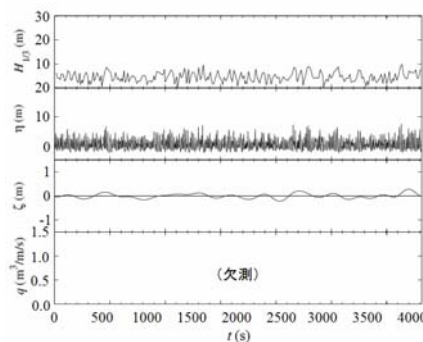
(e) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

(1) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )

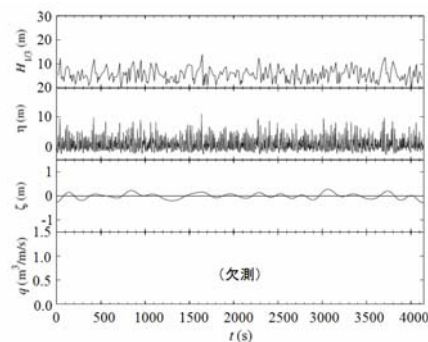
(a) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$  … 図を省略

(b) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$  … 図を省略

(c) 周期 8.0s,  $\gamma=1.0$  … 図を省略



(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$



(e) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

(2) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )

図-4.10 波群特性と短時間越波量の関係：「消波護岸」

(上段から順に、直立護岸前面波高，前面水位変動，前面水位の長周期変動，短時間越波流量)

## (2) 短時間越波流量

図-4.10に、「消波護岸」に対する短時間越波流量と波群特性の関係を示す。ただし、図-4.10(1)(c)、(2)(d)、(e)については越波量が非常に小さいために欠測扱いにした。また、図-4.10(2)(a)、(b)、(c)については護岸前面の水位変動を計測していないために図面を省略した。「直立護岸」の場合と同様に、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きくなるほど、波群に伴う水面の長周期変動と高波の連なりを確認することができる。特に、護岸

天端高が低い場合では、波群の形成が確認された時期に顕著な長周期変動が発生し、その水位上昇時と高波の連なりの位相が一致する時間帯に短時間越波流量が増大している。一方、スペクトル尖鋭度が小さい場合にも、長周期変動の卓越時期に短時間越波流量が増大を確認できるが、その程度は小さい。さらに、周期 8.0s の場合では、波群に伴う顕著な水面の長周期変動や高波の連なりはみられない。

### 4.3 透過離岸堤を有する直立護岸の越波特性

#### (1) 時間平均越波流量

図-4.11 に、「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する護岸越波流量の周期による変化について、護岸天端高およびスペクトル尖鋭度ごとに示す。図の説明は、「直立護岸」の場合と同じである。ただし、護岸天端高の高い ( $h_c=8.0\text{m}$ ) 周期 8.0s (スペクトル尖鋭度:  $\gamma=1.0$ ) のケースでは、護岸越波が全く観察されなかったため、図にプロットされていない。「直立護岸」の場合と同様に、周期が長く、護岸天端高が低くなるほど、護岸越波流量が増大する傾向にある。また、護岸天端高にかかわらず、周期 14.0s のケースではスペクトル尖鋭度が大きいほど、周期 17.0s のケースではスペクトル尖鋭度が小さいほど、護岸越波流量が大きい。これらの関係は、「直立護岸」において考察したように、水面の長周期変動と高波高 (波による水位変動) の出現確率という 2 つの観点に着目して整理することができる。

#### (2) 短時間越波流量

図-4.12 に、「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する短時間越波流量と波群特性の関係を示す。ただし、図

-4.12 (1) (c), (2) (a) ~ (e) については越波量が非常に小さいため、短時間越波流量の図面を表示していない (欠測表示)。「直立護岸」の場合と同様に、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きくなるほど、波群に伴う水面の長周期変動と高波の連なりを確認することができる。特に、護岸天端高が低い場合では、波群の形成が確認さ

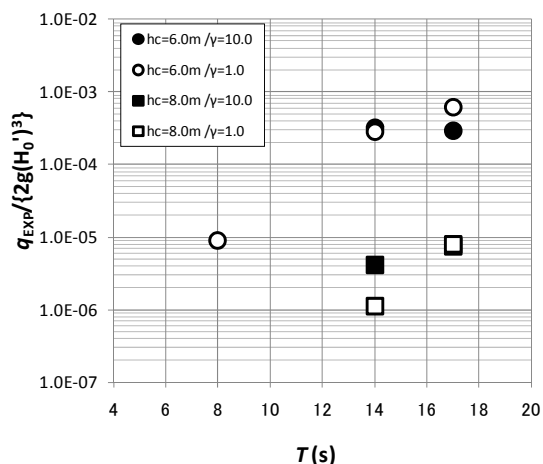
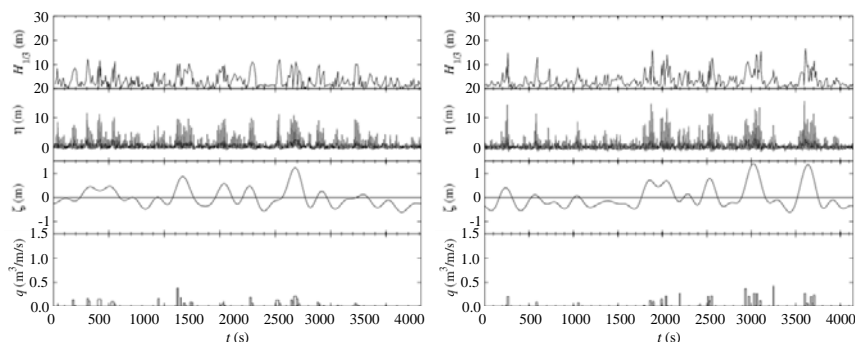
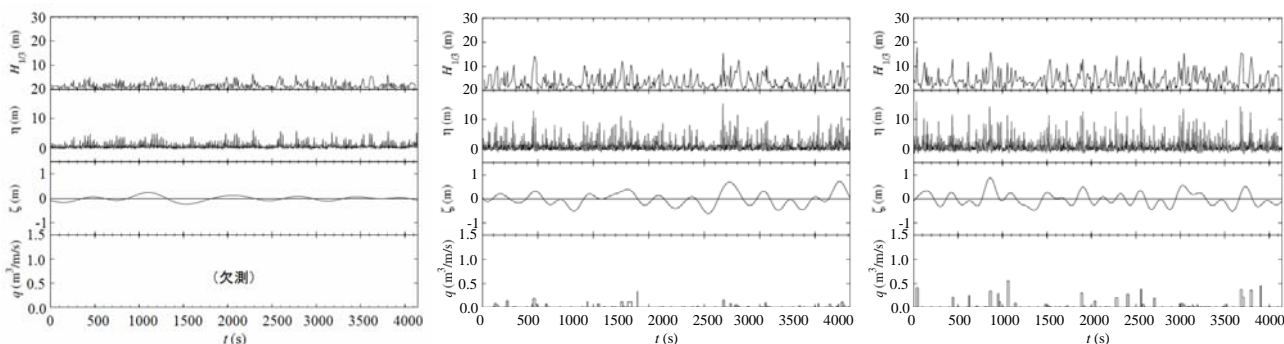


図-4.11 「透過離岸堤を有する直立護岸」における護岸越波流量



(a) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

(b) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



(c) 周期 8.0s,  $\gamma=1.0$

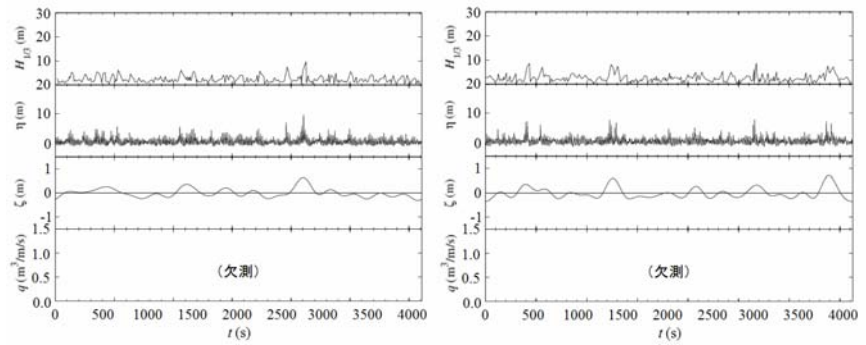
(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$

(e) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

(1) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )

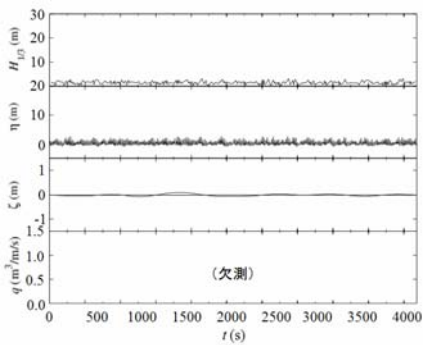
図-4.12 波群特性と短時間越波流量の関係: 「透過離岸堤を有する直立護岸」

(上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量)

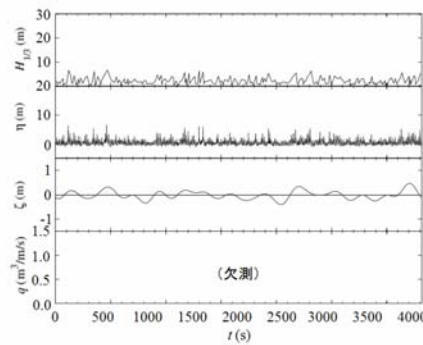


(a) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

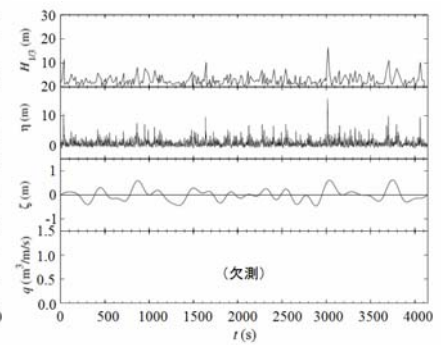
(b) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



(c) 周期 8.0s,  $\gamma=1.0$



(d) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$



(e) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

(2) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )

図-4.12 波群特性と短時間越波流量の関係：「透過離岸堤を有する直立護岸」(続き)  
(上段から順に、直立護岸前面波高、前面水位変動、前面水位の長周期変動、短時間越波流量)



(a) 来襲前

(b) 透過離岸堤乗り越え時

(c) 打ち上げ時

(d) 打ち上げ後

写真-4.1 「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する越波の様子

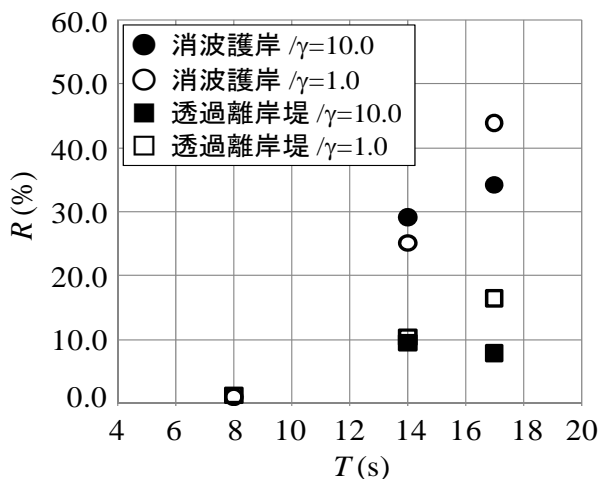
れた時期に顕著な長周期変動が発生し、その水位上昇時と高波の連なりの位相が一致する時間帯に短時間越波流量が増大している。しかしながら、「直立護岸」の場合に比べ、水面の長周期変動は大きい、護岸越波流量は非常に小さい。これは、護岸形状により、越波の様子や水塊の挙動が異なるためである。すなわち、直立護岸の少し沖側に透過離岸堤を有する場合には、来襲波が透過離岸堤上を乗り越え、その水塊が直立護岸と透過離岸堤の法面で形成される水域に流れ込むと同時に直立護岸に衝突し、越波を生じずに鉛直上向きへ打ち上げられる(写真-4.1)。また、この打ち上げられた水塊のこの水域への流入により一時的な水位上昇が発生する一方で、消波ブ

ロックにより短周期成分のエネルギーは減衰する。この結果、水面の長周期変動は「直立護岸」の場合に比べて大きくなるものの、護岸越波量は小さくなったと考えられる。

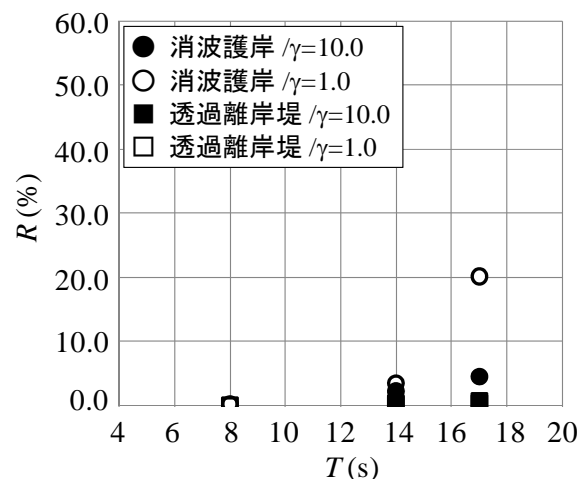
#### 4.4 護岸形状による越波特性の比較

(1) 各護岸形状に対する越波流量低減効果

図-4.13に、護岸形状の違いによる越波低減効果を比較した結果を示す。ここで、図の縦軸は、「直立護岸」に対する越波流量を100としたときの各護岸形状に対する越波流量を表した値であり、この値が小さいほど、越波低減効果が大きいことを意味する。なお、時間平均越波



(a) 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ )



(b) 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )

図-4.13 各護岸形状の越波流量低減効果

流量と同様に、これらのプロットは3波群の平均値を示している。

護岸天端高が低い場合では、「消波護岸」に対する越波流量は、「直立護岸」に比べ、周期 8.0s のケースでは1割未満、周期 14.0s のケースでは3割程度、周期 17.0s のケースでは4割程度に低減する。また、「消波護岸」の消波ブロック被覆工と断面積がほぼ等しい「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する越波流量は、「直立護岸」に比べ、周期 8.0s のケースでは1割未満、周期 14.0s のケースでは1割程度、周期 17.0s のケースでは2割程度に低減する。さらに、両者を比較すると、「透過離岸堤を有する直立護岸」の越波流量は、「消波護岸」に比べ、概ね1/3程度に低減している。

「消波護岸」では、来襲波のエネルギーは護岸前面まで減衰せず、護岸直前に設置した消波ブロック内を波が通過することによりそのエネルギーが減衰し、結果的に越波流量が低減される。一方、「透過離岸堤を有する直立護岸」では、消波ブロック内部を波が通過することにより波エネルギーが減衰することに加え、消波ブロックを護岸から少し沖側の離れた位置に設置することにより、護岸前面ではなく、護岸より少し沖側で強制的に砕波を促進させて波のエネルギーを減衰させている。そのため、「消波護岸」よりも「透過離岸堤を有する直立護岸」において越波流量を低減させる効果が大きくなったと考えられる。また、護岸より少し沖側に消波ブロックを設置することにより、「消波護岸」の場合よりも消波ブロックの法面を駆け上った水塊による越波の発生が抑制されたことも要因の一つであると考えられる。

一方、護岸天端高が高い場合でも、これらとほぼ同様

な傾向が確認できる。しかしながら、護岸天端高が低い場合に比べて越波流量の絶対値が小さいため、消波工や透過離岸堤による越波流量の低減効果はより顕著に表れている。なお、護岸天端高にかかわらず、消波工や透過離岸堤による越波流量の低減効果は、スペクトル尖鋭度が大きい場合においてより顕著に表れている。したがって、これらの越波低減対策は、通常の風波による高波浪だけでなく、長周期うねりに対してより有効に機能することが期待される。

#### (2) 消波工天端高の違いによる経済性について

次に、護岸形状の違いによる経済性 (=消波ブロックの施工費) について検討を行うため、「透過離岸堤を有する直立護岸」と同等な越波低減効果が期待できる「消波護岸」の護岸天端高およびその天端高に対して天端2個並び・完全消波とするために必要な消波ブロックの個数 (=断面積) を算出した。ただし、これらの施工費の算出において、必要なブロック形状や重量の検討は行っていない。したがって、それらに応じた費用の増減は無視していることに注意されたい。

図-4.14 には、護岸前面波長で無次元化した護岸天端高 (=相対護岸天端高) と換算沖波波高で無次元化した「消波護岸」に対する護岸越波流量の関係を示す。これらは、図中に示したべき乗式によってほぼ近似できる。そこで、この式を用いて、護岸天端高の低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ ) において、「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する越波流量 ( $q_r$ ) と同等な越波流量となることが期待される「消波護岸」の護岸天端高 ( $h_c'$ ) を算出した (表-4.1)。さらに、これらの護岸天端高に対して施工さ



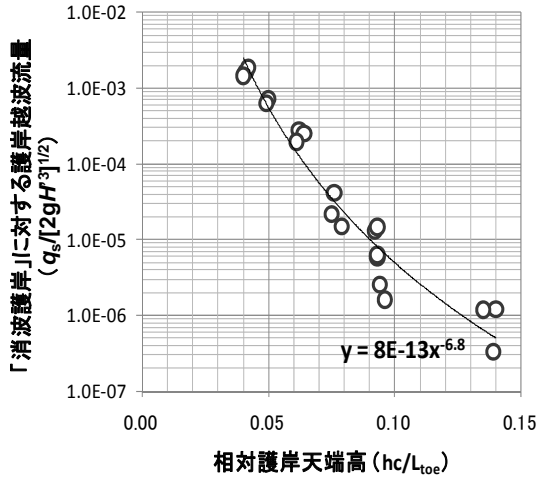


図-4.14 相対護岸天端高と「消波護岸」に対する護岸越波流量（無次元量）の関係

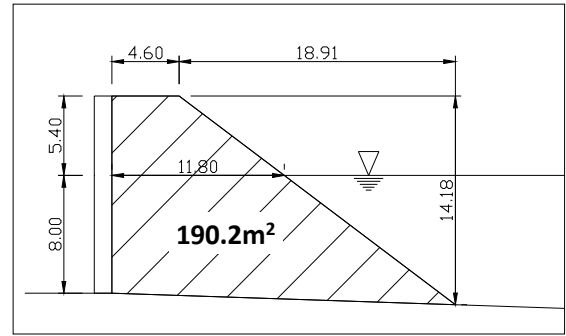
表-4.1 「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する護岸越波流量と同等の越波流量が許容可能な「消波護岸」の護岸天端高および消波ブロック断面積

$T_{1/3}$ (s)	$q_r$	$h_c/L_{10e}$	$L_{10e}$ (m)	護岸天端高 $h_c'$ (m)	消波ブロック 断面積( $m^2$ )
8.0	$1.687 \times 10^{-5}$	0.084	64.60	5.4	190.2
14.0	$2.863 \times 10^{-4}$	0.055	121.13	6.9	227.0
17.0	$6.183 \times 10^{-4}$	0.049	146.67	7.3	237.4

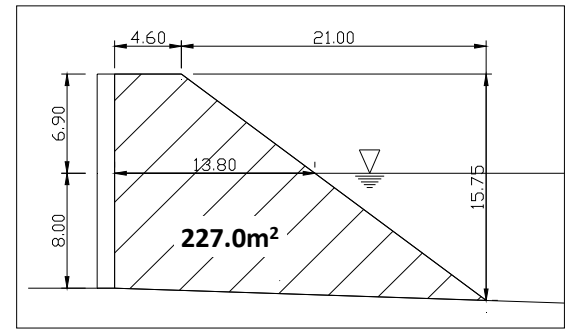
※法面勾配は 3/4 とした。

れる消波工の断面積を図-4.15 に示す。これらの結果と、実験で設定した護岸天端高 $h_c=6.0m$ に対する消波工および透過離岸堤の断面積（図-3.2，消波ブロック被覆工： $204.5m^2$ ，透過離岸堤： $242.3m^2$ ）を比較することにより，消波ブロックによる越波低減対策の費用対効果を考察した。

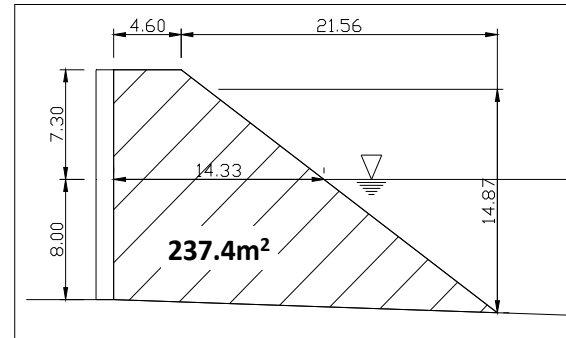
通常の高波浪（周期 8.0s のケース）の場合では，実験で設定した護岸天端高よりも 0.6m 低く（ $h_c'=5.4m$ ），小さい断面積（ $190.2m^2$ ）の消波工によって，「透過離岸堤を有する直立護岸」と同等な越波低減効果の期待できる「消波護岸」を整備することが可能であると言える。これは，「消波護岸」に対する越波流量が，「透過離岸堤を有する直立護岸」に対するものよりもわずかに小さいことに起因している。また，長周期うねり（周期 14.0s，17.0s のケース）の場合でも，実験で設定した透過離岸堤の断面積よりも小さい断面積（ $227.0m^2$ ， $237.4m^2$ ）の消波工によって，「透過離岸堤を有する直立護岸」と同等な越波低減効果の期待できる「消波護岸」を整備することが可能であると言える。しかしながら，この整備を行う場合には，護岸天端高を 0.9m，あるいは 1.3m 嵩上げ（ $h_c'=6.9m$ ， $h_c'=7.3m$ ）することが必要となる。すなわち，海上空港



(a)  $h_c=5.4m$



(b)  $h_c=6.9m$



(c)  $h_c=7.3m$

図-4.15 同一並び個数における天端高による消波ブロック断面積の比較

護岸における空域制限などのように，設置できる護岸天端高に何らかの制約が与えられている場合には，実質的には施工が困難な場合が想定される。

### (3) 消波工天端幅の違いによる経済性について

そこで次に，このような施工条件を想定し，消波工天端幅の拡張という観点から護岸形状の違いによる経済性について検討を行った。この検討では，合田・岸良（1976）による消波護岸に関する所要天端高と消波工天端幅の関係を活用した（図-4.16）。この図は，消波ブロック2層被覆の場合の結果であり，本実験条件である全断面消波の場合に対応させるため，横軸の法肩（下層）ブロック数

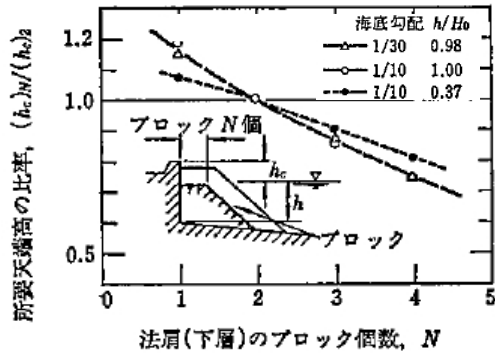


図-4.16 所要天端高に及ぼす消波工天端幅の影響（合田ら（1976）の図13を転載）

を消波工天端幅（天端に並ぶ消波ブロックの個数： $N$ ）に置き換えた。また、本実験の海底勾配が1/30であるため、所要天端高と消波工天端幅の関係について図中の△印を採用した。なお、図の縦軸は、天端2個並びの護岸天端高に対する所要消波ブロック個数に対応する天端高の比を表している。表-4.1より、周期14.0s、17.0sのケースにおいて、「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する越波流量（ $q_r$ ）と、同等な越波低減効果の期待できる天端2個並びの「消波護岸」の護岸天端高はそれぞれ $h_c'=6.9\text{m}$ 、 $7.3\text{m}$ であった。一方、今回の実験で想定した護岸天端高 $h_c=6.0\text{m}$ に対するこれらの比率は、それぞれ $h_c/h_c'=0.87$ 、 $0.82$ であることから、これらを図-4.16にあてはめ、対応する消波工天端幅（ブロック個数）を読み取ると、いずれも $N=4$ を得た。さらに、このとき施工される消波工の断面積を算出した（表-4.2、図-4.17）。この結果、周期14.0sおよび周期17.0sのケースの両方に対して天端4個並び（ $N=4$ ）の断面積（ $288.0\text{m}^2$ ）が必要となり、同等な越波低減効果を有する透過離岸堤の断面積（ $242.3\text{m}^2$ ）よりも大きくなることが推定された。したがって、護岸天端の嵩上げが容易でない場合には、少なくとも長周期うねりのような周期の長い波浪に対して、直立護岸の少し沖側に透過離岸堤を設置することにより、完全消波とした消波ブロック被覆工よりも安価かつ効率的に、護岸越波量を低減できることが期待される。

このように、消波ブロック被覆工の代わりに、これとほぼ等しい断面積を有する離岸堤を前面に設置することにより、通常の高波浪だけでなく、長周期うねりに対する護岸越波量を低減することが可能であることがわかった。

## 5. 護岸波圧特性について

### 5.1 直立護岸の波圧特性

表-4.2 「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する護岸越波流量と同等の越波流量が許容可能な「消波護岸」の消波工天端幅（消波ブロックの個数）および消波ブロック断面積

$T_{1/3}$ (s)	$q_r$	護岸天端高 $h_c'$ (m)	天端高比率 $h_c/h_c'$	必要消波ブロック $N$	消波ブロック 断面積( $\text{m}^2$ )
14.0	$2.863 \times 10^{-4}$	6.9	0.87	4	288.0
17.0	$6.183 \times 10^{-4}$	7.3	0.82	4	288.0

※法面勾配は3/4とした。

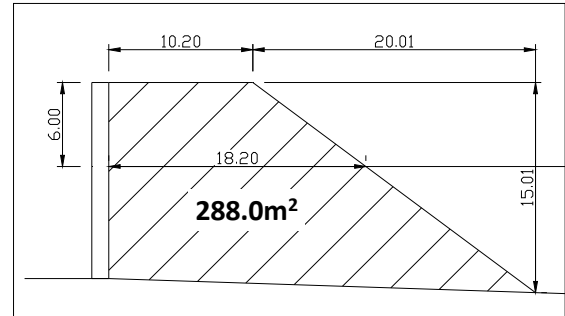


図-4.17 天端4個並び（ $N=4$ ）の消波ブロック断面積

図-5.1 に、「直立護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布を示す。図の横軸は最大波圧強度で、縦軸（ $z$ ）は静水面からの鉛直高さである。ここで、波圧計測は初期乱数の異なる3波群について行い、その平均値を“average”として表した。また、図中の凡例の“GODA”は合田の波圧式による推定値、“GODA+ $\alpha$ ”は衝撃砕波圧を考慮した推定値を表している。ただし、本実験で採用した模型形状は合田の波圧式が適用可能な混成防波堤ではないが、海底斜面を混成防波堤のマウンドとみなして推定値を算出した。なお、本節以降では、計測を実施した護岸天端高の低い場合（ $h_c=6.0\text{m}$ ）についてのみ、考察を行った。

図よりわかるように、護岸に作用する最大波圧強度は、静水面より上方において大きくなる傾向にあり、周期およびスペクトル尖鋭度が大きくなるほど、最大波圧強度の最大値が大きくなる。これは、スペクトル尖鋭度が大きくなると、波群の形成や高波の連なりにより一度に来襲する水塊が増大し、大きな波高となって護岸に作用するためであると考えられる。また、本実験では上記のことに加え、砕波する直前の波形が非常に前傾化した状態で護岸に作用していた頻度が大きかったため、より一層最大波圧強度が増大したものと考えられる（風波に対して2~4倍程度増大）。合田の波圧式と実験で得られた最大波圧強度の最大値を比較すると、今回の実験条件では、合田の波圧式による推定値が実験値よりも0.4~0.8倍程度過小に推定される傾向にあり、特に静水面近傍にお

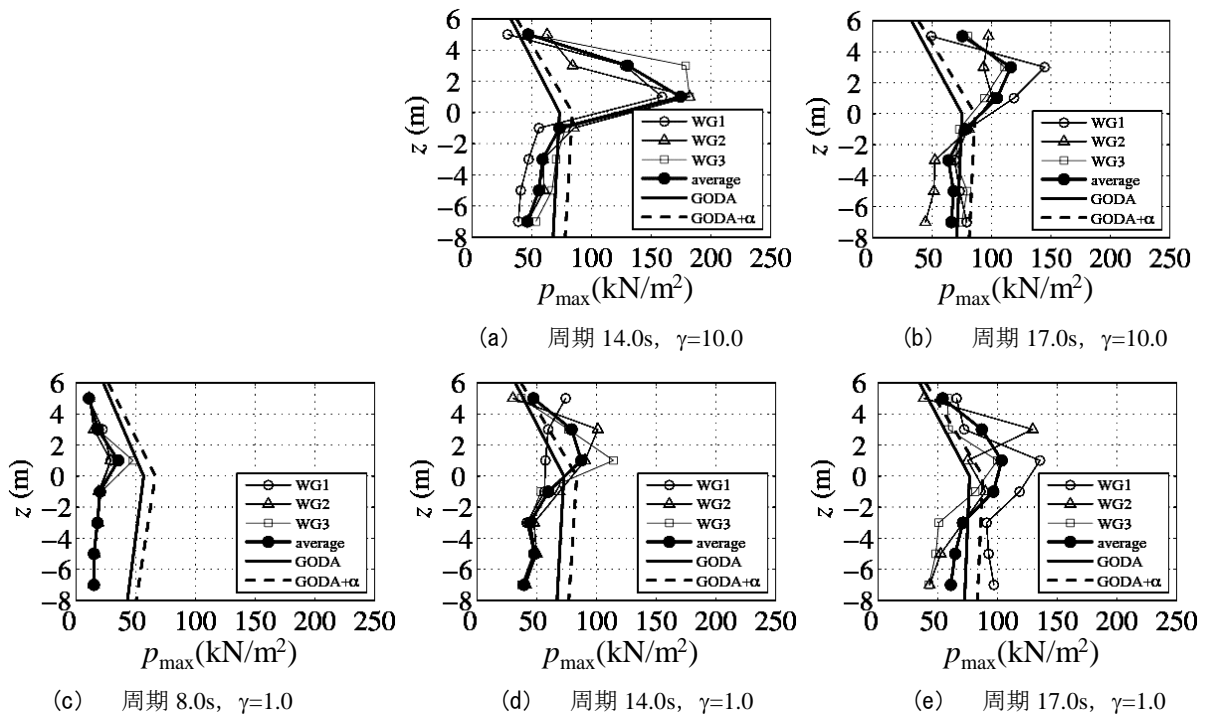


図-5.1 「直立護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布

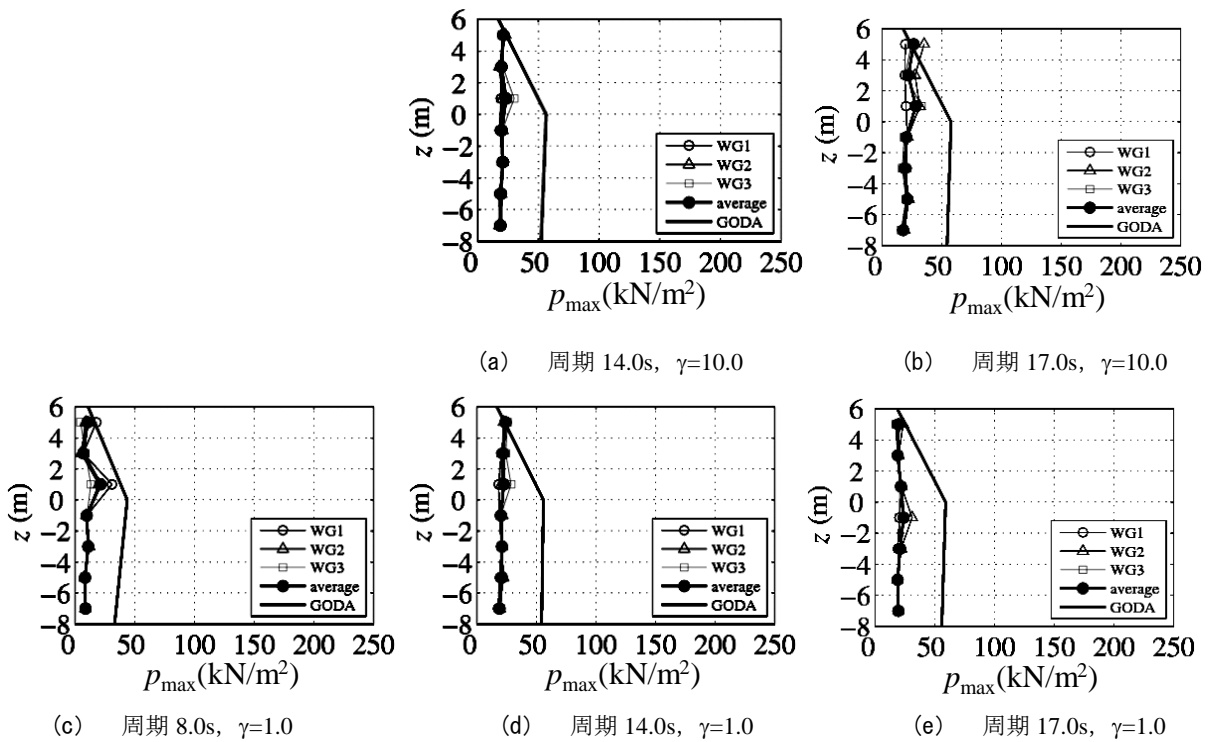


図-5.2 「消波護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布

る差異が顕著である。

## 5.2 消波護岸の波圧特性

図-5.2に、「消波護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布を示す。図の説明は「直立護岸」の場合と同様である。これらの図より、来襲波の周期やスペクトル尖鋭度にか

ならず、波圧強度はほぼ一様に低減していることがわかる。これは、護岸前面に設置された消波ブロックにより、どのような波浪に対しても消波機能を発揮し、特に、衝撃的な波圧が護岸に作用することを防いでいるためと考えられる。また、今回の実験条件では、「消波護岸」に対する合田の波圧式による推定値は、実験値よりも約2.5倍過大に評価される。

### 5.3 透過離岸堤を有する直立護岸の波圧特性

図-5.3に「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布を示す。ただし、このような条件で合田の波圧式を適用することは相応しくないため、これによる推定値は示していない。これらの図より、最大波圧強度の鉛直分布形状は「直立護岸」に対する波圧分布の形状と比較的類似していることがわかる。すなわち、静水面より上方において最大波圧強度の最大値が検出され、周期が長く、スペクトル尖鋭度が大きくなるほど、最大波圧強度の最大値が大きくなる。これは、護岸より少し沖側に消波ブロックが設置されていることにより、静水面より下方ではこの消波ブロックにより波エネルギーが減衰されて波圧強度が小さくなり、静水面より上方では消波ブロックの法面を駆け上った波が護岸に直接作用することにより波圧強度が局所的に増大したものと考えられる。また、波圧強度の出現特性が「直立護岸」に類似したのは、直立護岸と透過離岸堤の間に水域があり、

水塊が直接直立護岸に作用したためと考えられる。

### 5.4 護岸形状による波圧特性の比較

図-5.4に、護岸形状の違いによる越波低減効果を比較したものを示す。図の横軸は「直立護岸」に対する最大波圧強度を100とした時の各護岸形状に対する最大波圧強度を表した値であり、この値が小さいほど、波圧低減効果が大きいことを意味する。

これらの図より、「透過離岸堤を有する直立護岸」では、「消波護岸」の場合よりも波圧低減効果が小さいことがわかる。特に、静水面近傍や上方においてほとんど低減効果が発揮されない場合がある。これは、「消波護岸」では直立護岸前面に消波ブロックを設置することにより直接防護効果が発揮されているのに対し、「透過離岸堤を有する直立護岸」では波エネルギーが減衰されるのみで、直立護岸を直接防護する機能を有していないためである。また、護岸より少し沖側に消波ブロックが設置されているため、消波ブロックを駆け上がって直立壁に打ち込むように作用する波に対しては、十分な低減効果が発揮されない。そのため、静水面より上方において発生する局所的な波圧に対し、低減効果を期待することが難しいと考えられる。

## 6. 結論

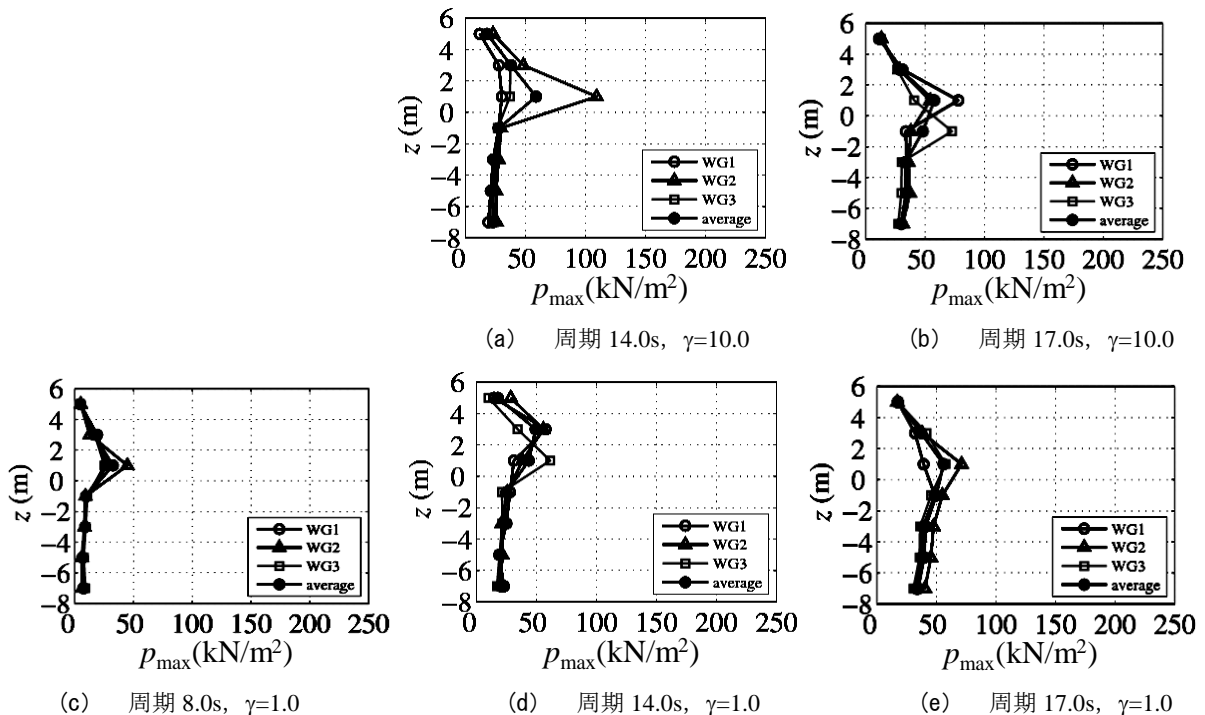


図-5.3 「透過離岸堤を有する直立護岸」に対する最大波圧強度の鉛直分布

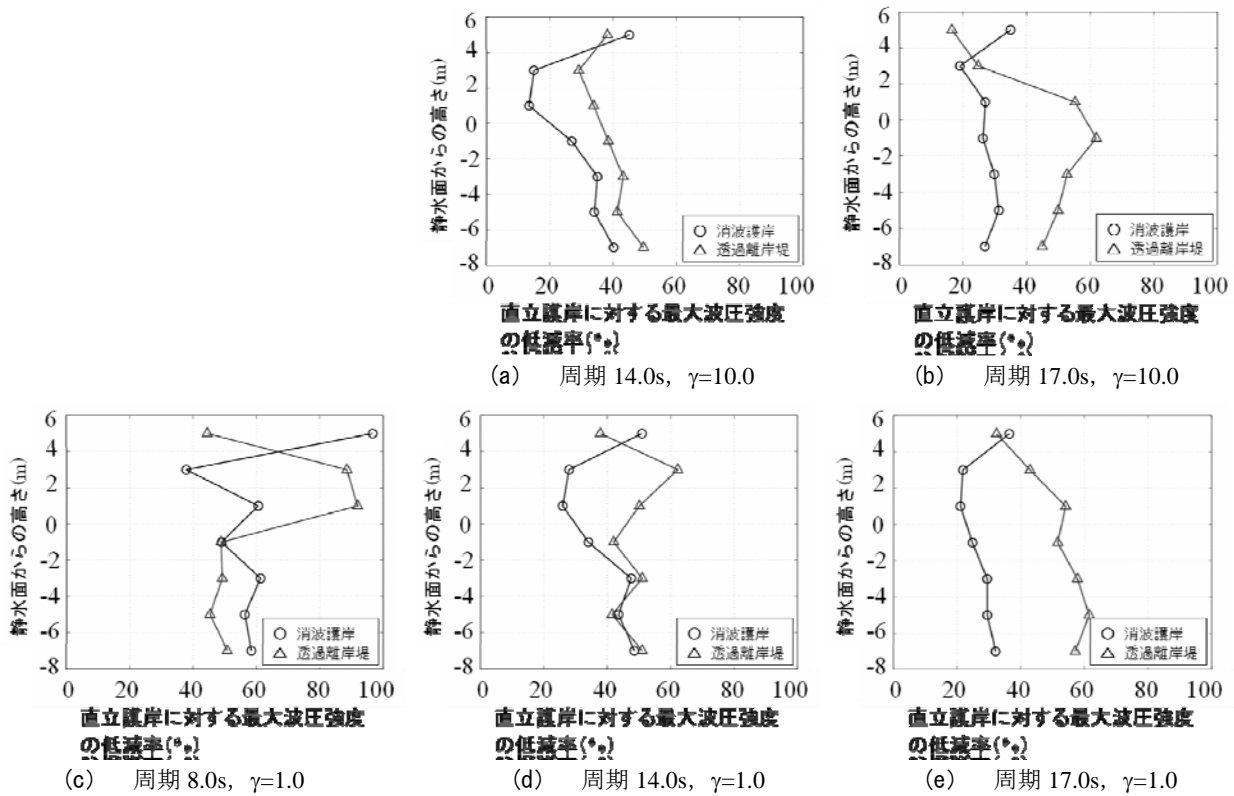


図-5.4 各護岸形状の波圧強度低減効果

本研究では、断面水路を用いた水理模型実験により、長周期うねりに対する護岸越波・波圧特性を明らかにするとともに、長周期うねりに対する越波低減機能を発揮しうる対策工断面の提案を試みた。

断面実験の結果より、長周期うねりの直立護岸に対する越波量は、通常的设计波よりも周期が長いことに十分配慮すれば、既存の越波流量算定図を用いて算定することが概ね可能であることが確認された。ただし、長周期うねりに顕著な波群の影響を受けて越波量が増加する危険性があることに注意が必要である。

長周期うねりの直立護岸に作用する最大波圧強度は、静水面より上方において大きくなる傾向にあり、その最大値は通常の風波に比べ、砕波帯内において2~4倍程度大きいことが確認された。

消波ブロック被覆工の代わりに、これとほぼ同等の断面積を有する離岸堤を直立護岸の前面に設置することにより、長周期うねりの護岸越波量を直立護岸に比べて概ね10%以下まで低減させる効果が期待できることが確認された。ただし、この断面は直立護岸を直接防護する機能を有していないため、静水面より上方において発生する局所的な波圧に対して低減効果が十分発揮されない場合がある。

## 7. あとがき

本研究では、性能設計で考慮すべき長周期うねりの護岸越波量および作用波圧についてその特性を整理した。その結果、長周期うねりの波群に伴う長周期変動による越波量の増大があるものの、長周期うねりの護岸越波量は既存の越波算定方法から概ね評価することが可能であることなどが明らかになった。また、提案する護岸形式に対する長周期うねりの護岸越波量の低減機能についても知見が得られた。

今後、長周期うねりの来襲が予想される沿岸構造物の設計において、これらの知見が活用されることが期待される。

(2010年6月18日受付)

## 参考文献

- 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司 (1989) : 不規則波における越波量の出現分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.618-622.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975) : 不規則波による棒は護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44.

- 合田良実・岸良安治 (1976) : 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験, 港湾技術研究所資料, No.242, 28p.
- 合田良実 (2008) : CLASHデータベースに基づく統一的越波流量推定式の提案, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.939-944.
- 佐藤慎司・小杉俊夫・加藤憲一・口石孝幸 (1998) : 斉唱海岸における台風9720号による海岸被害とその原因, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.326-330.
- 佐藤慎司・河野龍男・諸田 勇・桜庭雅明・加藤俊夫 (1999) : 駿河海岸における台風来襲時の波浪特性と越波実態, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.766-770.
- 首藤伸夫 (1974) : 非線型長波の変形—水路幅, 水深の変化する場合—, 海岸工学論文集, 第21巻, pp.57-63.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992) : 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.581-585.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982) : 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205.
- 田島芳満・石指裕章・佐藤慎司 (2009) : 地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.211-215.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎 (2008) : 偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985.
- 平山克也・長谷川準三・長谷川 巖 (2006) : 越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.706-710.
- 平山克也・加島寛章・仲井圭二 (2009) : 長周期うねりのスペクトルと波群特性に関する考察, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.635-640.
- Janssen, T. T., J. A. Battjes, and A. R. van Dongeren (2003) : Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom, *Journal Geophysical Research*, Vol. 108, No. C8, 3252, doi:10.1029/2002JC001515.
- List, J. H. (1991) : Wave groupiness variation in the nearshore, *Coast Engineering*, 15, pp.475-496.
- $H_0'$  : 換算沖波波高 (m)
- $H_{toe}$  : 護岸前面における有義波高 (m)
- $K_s$  : 非線形浅水係数
- $L_0$  : 沖波波長 (m)
- $L_{toe}$  : 護岸前面波長 (m)
- $N$  : 天端に並ぶ消波ブロックの個数
- $N_{data}$  : 計測データ数
- $N_{wave}$  : 計測波数
- $q_{EXP}$  : 時間平均越波流量 ( $m^3/m/s$ )
- $q_r$  : 透過離岸堤を有する直立護岸に対する時間平均越波流量 ( $m^3/m/s$ )
- $P$  : 最大波圧強度 ( $kN/m^2$ )
- $R$  : 相互相関係数
- $T$  : 計測時間 (s)
- $T_{1/3}$  : 入射波周期 (s)
- $T_{bar}$  : 平均周期 (s)
- $\gamma$  : スペクトル尖鋭度
- $\varepsilon$  : 相互相関係数が最大となる無次元位相差
- $\sigma_{A2}$  : 包絡波形の2乗値の標準偏差
- $\sigma_{\zeta}$  : 長周期変動水位の標準偏差
- $\zeta$  : 長周期変動水位 (m)

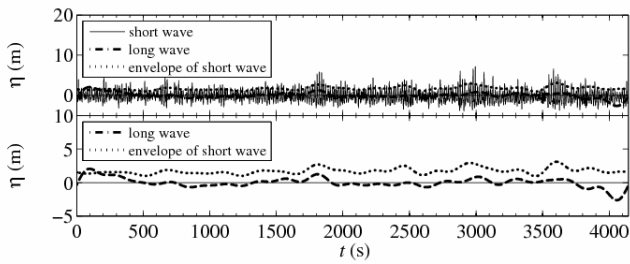
## 記号表

- $A$  : 包絡波形 (m)
- $dt$  : サンプル時間間隔 (s)
- $h_c$  : 護岸天端高 (m)
- $h_{off}$  : 実験水深 (m)
- $h_{toe}$  : 護岸前面水深 (m)

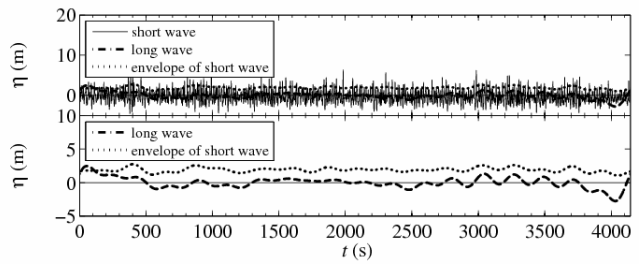
付録

来襲波の包絡波形と長周期変動の水位変動の位相差を算出するために使用した両波形を図-付録1.1, 1.2に示す。

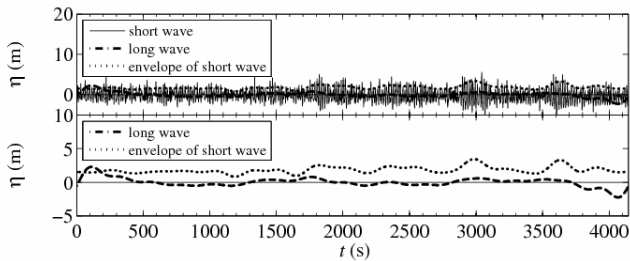
ただし、長周期変動の振幅値が小さいために10倍表示している。



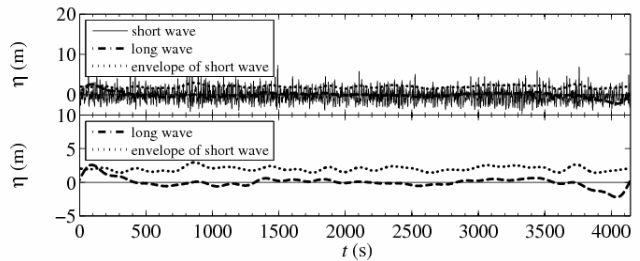
(a) ch1



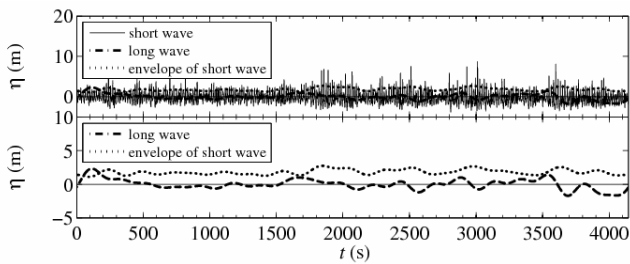
(a) ch1



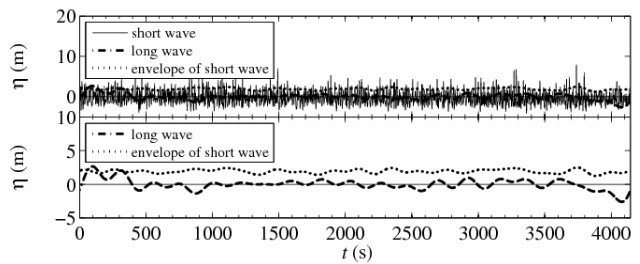
(b) ch4



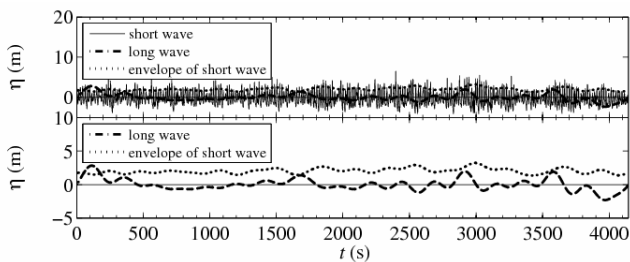
(b) ch4



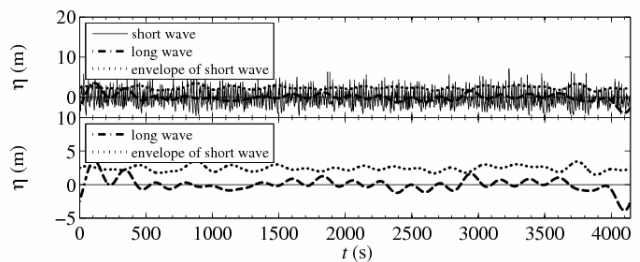
(c) ch8



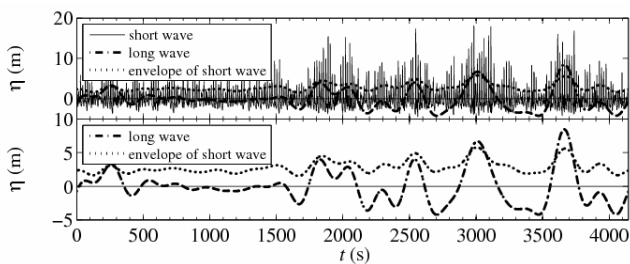
(c) ch8



(d) ch17

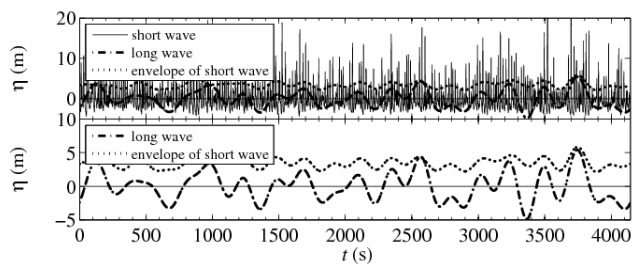


(d) ch17



(f) ch18 (直立護岸前面)

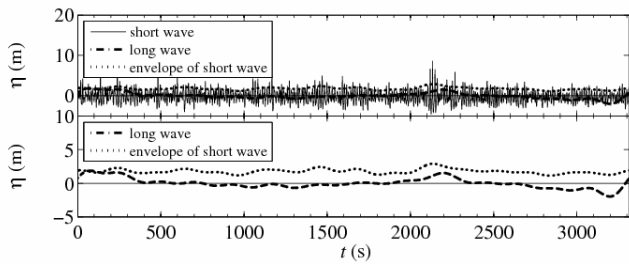
(1) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



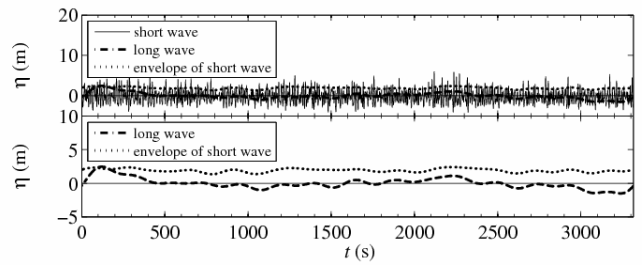
(f) ch18 (直立護岸前面)

(2) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

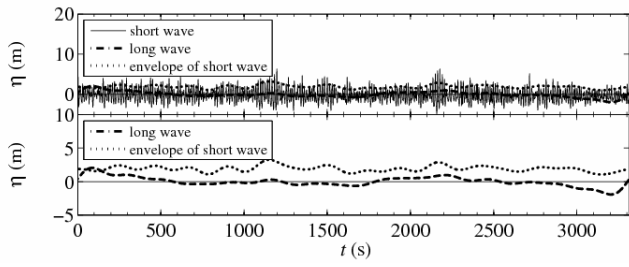
図-付録 1.1 来襲波の包絡波形（点線）と長周期変動（一点鎖線）の位相関係：護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0m$ )



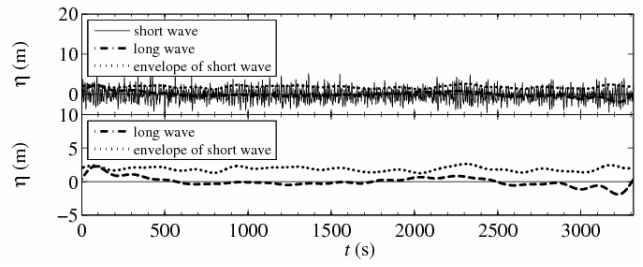
(a) ch1



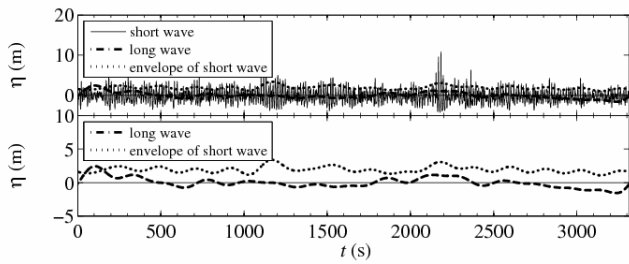
(a) ch1



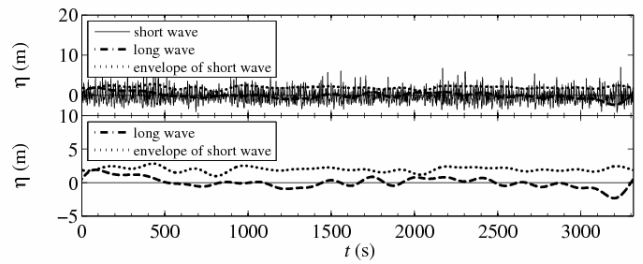
(b) ch4



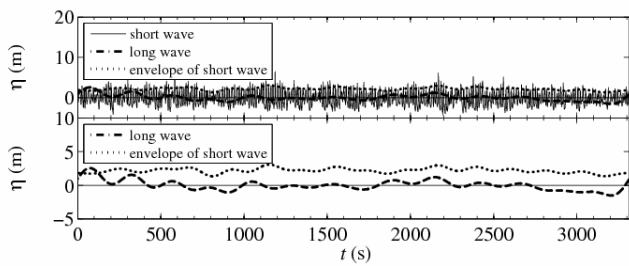
(b) ch4



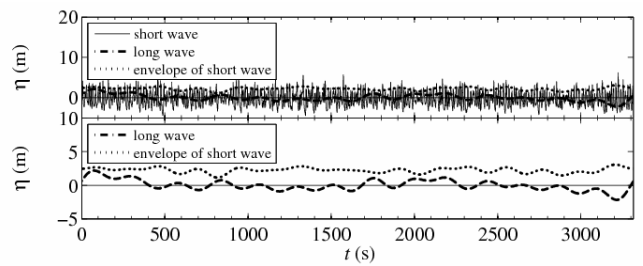
(c) ch8



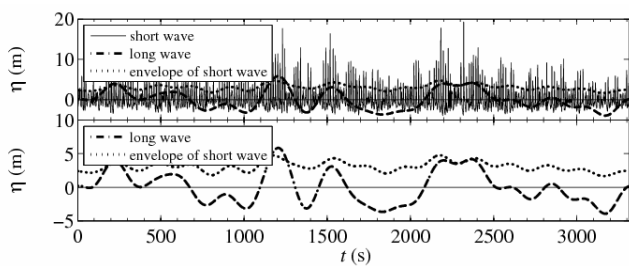
(c) ch8



(d) ch17

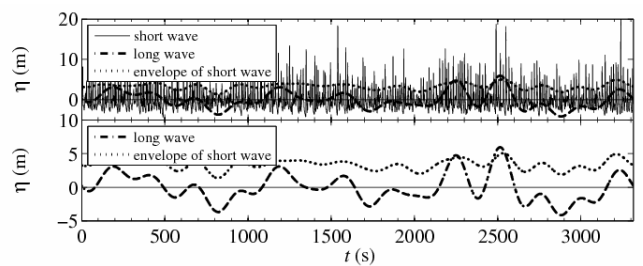


(d) ch17



(f) ch18 (直立護岸前面)

(3) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$

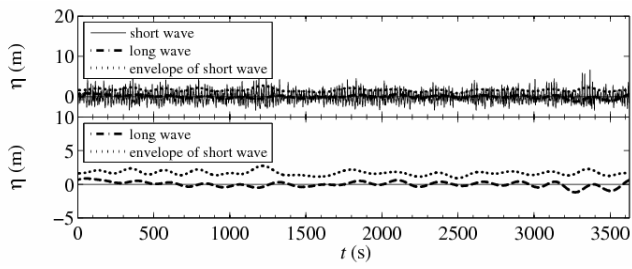


(f) ch18 (直立護岸前面)

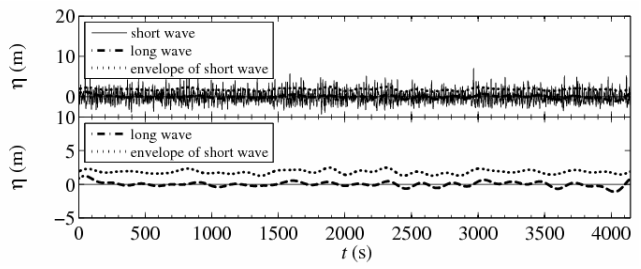
(4) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$

図-付録 1.1 来襲波の包絡波形 (点線) と長周期変動 (一点鎖線) の位相関係: 護岸天端高が低い場合 ( $h_c=6.0\text{m}$ ) (続き)

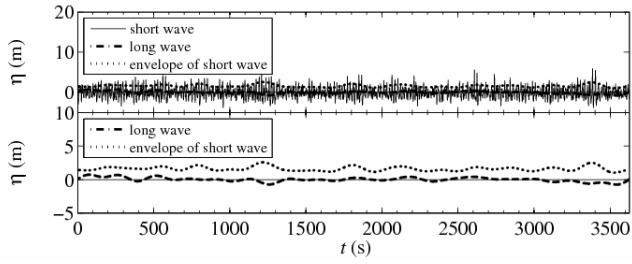




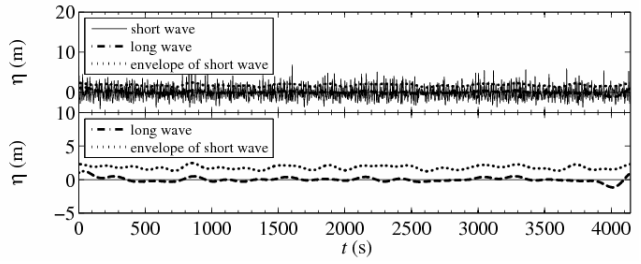
(a) ch1



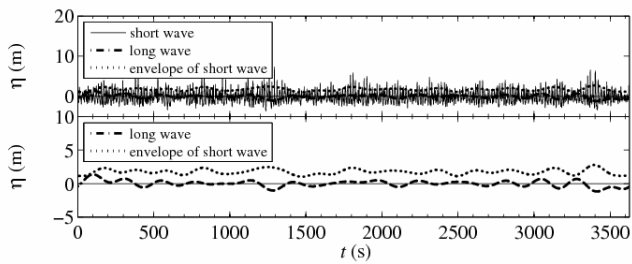
(a) ch1



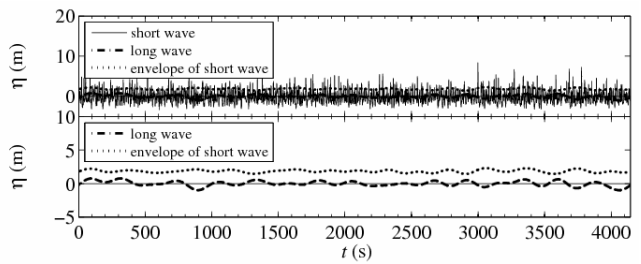
(b) ch4



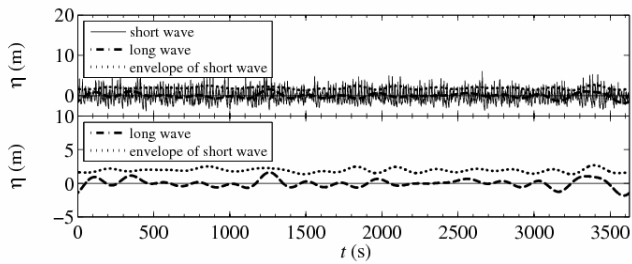
(b) ch4



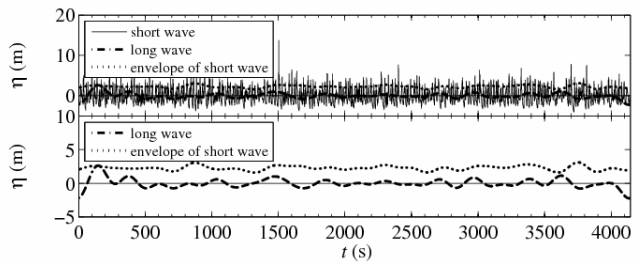
(c) ch8



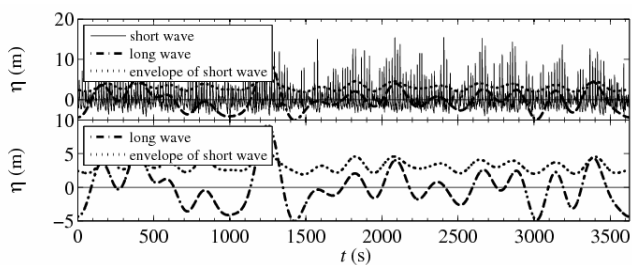
(c) ch8



(d) ch17

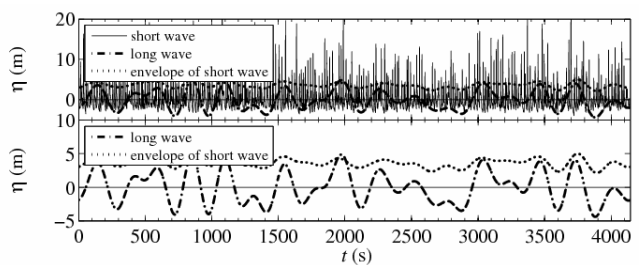


(d) ch17



(f) ch18 (直立護岸前面)

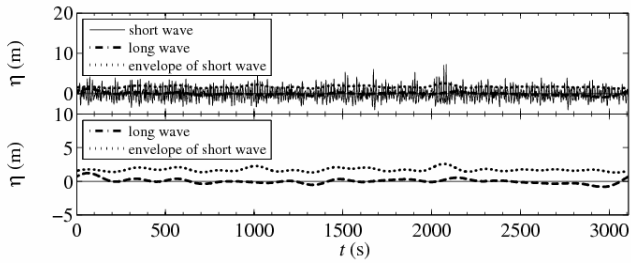
(1) 周期 17.0s,  $\gamma=10.0$



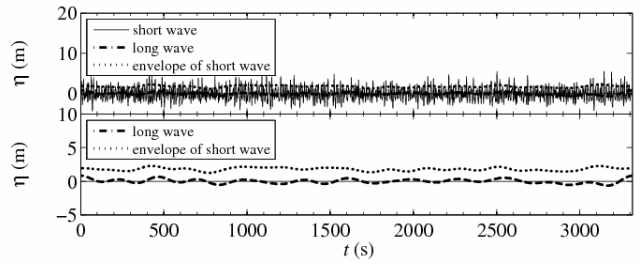
(f) ch18 (直立護岸前面)

(2) 周期 17.0s,  $\gamma=1.0$

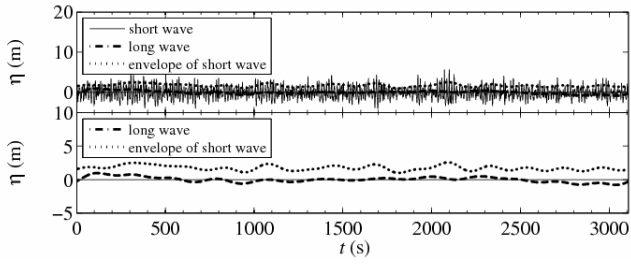
図-付録 1.2 来襲波の包絡波形 (点線) と長周期変動 (一点鎖線) の位相関係: 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ )



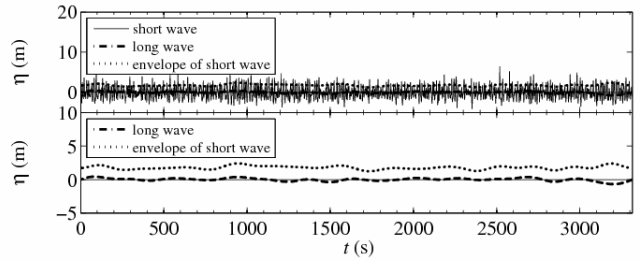
(a) ch1



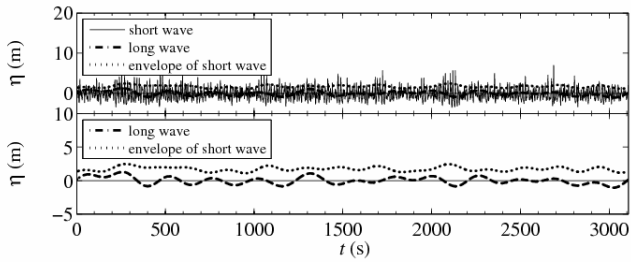
(a) ch1



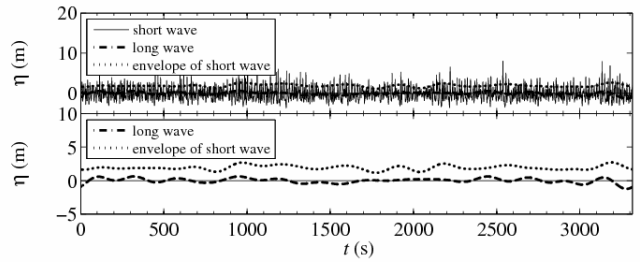
(b) ch4



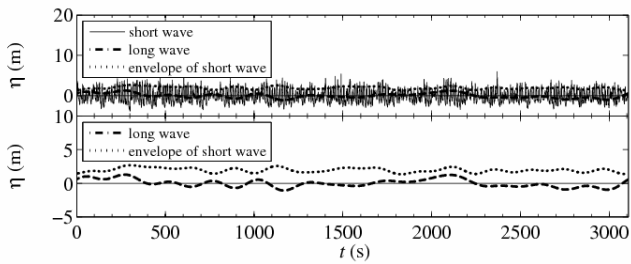
(b) ch4



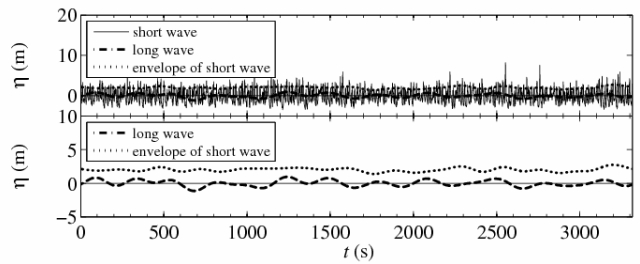
(c) ch8



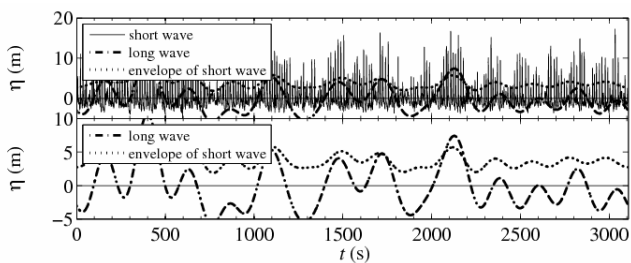
(c) ch8



(d) ch17

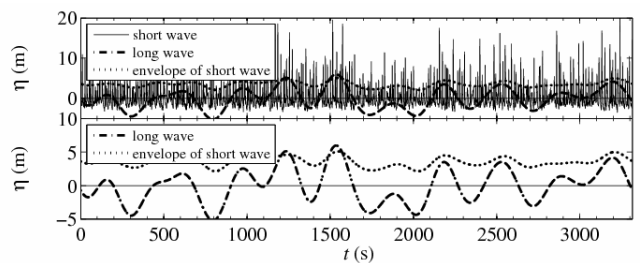


(d) ch17



(f) ch18 (直立護岸前面)

(3) 周期 14.0s,  $\gamma=10.0$



(f) ch18 (直立護岸前面)

(4) 周期 14.0s,  $\gamma=1.0$

図-付録 1.2 来襲波の包絡波形 (点線) と長周期変動 (一点鎖線) の位相関係: 護岸天端高が高い場合 ( $h_c=8.0\text{m}$ ) (続き)