

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1286 June 2014

平面模型実験によるリーフ上護岸の越波量推定法の精度検証
—那覇空港増設滑走路護岸を対象として—

平山 克也
川内 清光

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. はじめに	4
2. リーフ上護岸の越波量推定法	4
3. 対象リーフ海域における波浪変形特性	5
3.1 計算条件	5
3.2 計算結果	6
4. リーフ上護岸を対象とした平面越波実験	7
4.1 波浪変形実験	7
4.2 平面越波実験	9
5. リーフ上護岸の推定越波量の精度検証	10
5.1 リーフ上波浪場の再現性	10
5.2 リーフ上護岸越波量の推定精度	11
5.3 越波排水路による護岸越波量の低減効果	13
6. まとめ	15
7. おわりに	15
謝辞	15
参考文献	15
記号表	16
付録A 波浪変形実験における波浪検定結果	17

Verification by Hydraulic Model Experiments for Estimated Wave Overtopping Rate on Seawalls Constructed on Wide-spread Coral Reef

Katsuya HIRAYAMA *

Kiyomitsu KAWAUCHI **

Synopsis

A wave overtopping rate for a seawall on coral reef may be evaluated with the estimation diagrams of it on sloping beach, which is proposed by Goda & Kishira (1975). To do this, Miyakuni et al. (2008) have suggested that wave set-up and surf-beat should be added to the design water depth which is applied on them. Moreover, Hirayama et al. (2009) have indicated that such design conditions on a coral reef can be calculated by using the Boussinesq-type wave transformation model developed by Hirayama & Hiraishi (2005).

In this study, an applicability of such estimation method is verified with the results of model experiments which are carried out on a horizontal basin, and it is confirmed that the calculations of wave transformation on coral reef should be conducted with the topography installed the designed seawalls. Moreover, a drain installed behind seawall can reduce wave overtopping rate in case that the water surface of drainage would keep lower level in the drain.

Key Words: Wave overtopping, coral reef, wave set-up, surf-beat, Boussinesq model

* Head, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Field

** Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Field
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

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

平面模型実験によるリーフ上護岸の越波量推定法の精度検証

— 那覇空港増設滑走路護岸を対象として —

平山 克也*・川内 清光**

要 旨

一様勾配斜面上の単純な護岸に対して提案された合田ら(1975)による越波流量推定図を用いて、リーフ上護岸の越波流量を推定することが試みられている。例えば、宮国ら(2008)は、堤前水深や護岸天端高の設定に必要な潮位を含めた設計水位に、リーフ上の平均水位上昇量及び0.7倍したサーフビート波高を加えるとともに、リーフ上の波高減衰を考慮して、換算沖波波高をリーフ上護岸前面での進行波の短周期波高から算定することを提案した。これらを越波流量推定図に適用して得られる推定値は、断面水路で得られた実験値と良く一致している。また、平山ら(2009)は、リーフ上におけるこれらの波浪諸元の平面分布をブシネスクモデルで算定することを提案した。しかし、このとき推定された護岸越波量に対して計測値による検証は行われておらず、また、沖のリーフ水域を埋め立てて建設される空港島護岸などのように、護岸法線背後の広いリーフ上波浪場がこれらの波浪諸元に与える影響などは考慮されていない。

そこで本研究では、このような広いリーフ上に設置される空港島護岸を対象として越波量を推定するとともに平面越波実験を実施して、その妥当性を検証した。その結果、リーフ上護岸の越波流量推定法は、護岸法線上の設計波浪諸元が正しく得られる場合にはある程度の妥当性を有しているものの、進行波の波浪変形計算のみで正しい設計波浪諸元が得られない場合には、護岸を設置した計算も行う必要があることが明らかとなった。また、越波排水路を有する護岸越波量の計測結果より、排水路内の水位が低く保たれている場合に護岸越波量の低減効果が期待できることを確認した。

キーワード：越波，リーフ，平均水位上昇，サーフビート，ブシネスクモデル

* 海洋研究領域波浪研究チーム チームリーダー

** 海洋研究領域波浪研究チーム 研究官
〒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:hirayama@pari.go.jp

1. はじめに

護岸設計では、背後地の利用形態に応じた許容越波量を満足する護岸断面であることを確認するために、一般に、合田ら（1975）による越波流量算定図等を用いて護岸越波量を推定する必要がある。この算定図は、単純な断面形状を有する一様勾配斜面上の直立護岸及び消波護岸に対して得られた断面越波実験結果をもとに、特定の斜面勾配及び波形勾配に対して提案されたものである。また高山ら（1982）は、このうち直立護岸に対する越波流量算定図の近似式（越波流量算定式）を提案しさまざまな斜面勾配や波形勾配に対する越波量の算定を可能にするとともに、換算天端高係数を導入し消波工天端幅の異なる消波護岸や直立消波護岸、階段護岸などに対する越波量も算定できることを示した。さらに平石ら（1996）は、護岸に斜め入射する波の越波量が低減することを平面越波実験結果から明らかにし、これをモデル化した修正天端高係数を用いて多方向不規則波の護岸越波量を推定することを提案した。

ところで、本研究で対象とした那覇空港増設滑走路護岸は広いリーフ地形上に建設されるため、その護岸設計において護岸越波量を算定する際には、護岸周辺の平面リーフ上で生じる複雑な波浪変形を適切に考慮しなければならない。そこで平山ら（2009）は、乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用した乱流モデルに基づく碎波減衰計算法、及び引き波時に海底面が露出することも許容する遡上計算法を備えたブシネスクモデル（NOWT-PARI, Ver5.2）（平山・平石, 2004, 2005）を用いて平面リーフ上の波浪場を算定し、リーフ上の波高減衰を考慮した換算沖波波高、及びそれに伴い発達するサーフビート波高と平均水位上昇量を考慮した設計潮位を用いることを提案しているが、このように推定される護岸越波量の妥当性については未だ検証されていない。

そこで本研究では、この方法にならない設計された那覇空港増設滑走路護岸の標準断面を対象とした平面越波実験を行い、広いリーフ上の比較的沖合に設置される護岸に対して推定された越波量の妥当性を検証するとともに、適用上の課題を明らかにすることを目的とした。なお、空域制限を受ける当該護岸のうち一部の工区においては、護岸背後の越波排水路による排水機能を積極的に考慮した二重護岸断面を採用し、護岸天端高を制限内に抑えつつ許容越波量を満足することが試みられている。他にあまり例をみないこのような断面の採用に当たっては、越波排水路の排水能力との関係を含め模型実験等による性能評価が不可欠であることから、当該護岸を対象とした

平面越波実験ではこれらの検討も合わせて行った。

2. リーフ上護岸の越波量推定法

川崎ら（2009）は、護岸前面のリーフ長を変えた断面越波実験を実施し、得られた無次元越波流量は、リーフ上水深に対する無次元リーフ長の増加とともに指数関数的に減少することを示した。また、宮国ら（2008）は、リーフ上で計測した平均水位上昇量と0.7倍したサーフビート波高を加えた設計水位、及びリーフ上護岸前面での短周期波高から算定した換算沖波波高を用いることで、断面越波実験で得られた護岸越波量は、合田（1975）による越波流量算定図を用いて推定できることを示した。

一方、平山ら（2009）は、リーフ上のサーフビート波高と0.5倍した平均水位上昇量を加えた設計水位、及びリーフ上での波浪減衰を考慮した換算沖波波高を合田ら（1975）による越波流量推定図に適用して、リーフ上護岸の越波量を推定するために、通常的设计波の算定と同様に護岸を設置しない海底地形（＝進行波浪場）を対象とし、これらの波浪諸量をブシネスクモデルによるリーフ上の波浪変形計算結果から以下の通り与えることを提案した。

まず、設計水位での堤前水深（＝設計水深 h_d ）は、次式のように算定される。

$$h_d = h + \eta_{\text{bar}} + \alpha H_{L1/3} \quad \alpha = ab \quad (1)$$

ここで、 h は潮位加算後の静水深である。係数 a 、 b はそれぞれ、サーフビート波高 $H_{L1/3}$ に対する波峰高の割合、及び進行波高に対する護岸前面波高の増幅率であり、 $a=0.5$ 、 $b=2.0$ （ $H_{L1/3}$ が進行波高の場合）が提案されている。また、 η_{bar} は、背後に陸地が控える（陸地から沖へ張り出した）裾礁上では護岸の有無による影響は小さいと考え、リーフ上の各地点で得られる値を用いることとされている。なお、これらはいずれも、リーフ上護岸の有無による違いを検討した計算結果に基づいている。

次に、換算沖波波高 H_0' は、リーフ上護岸前面の進行波の短周期波高 $H_{s1/3}$ から次式のように算定される。

$$H_0' = H_{s1/3} / K_s \quad (2)$$

ここで、 K_s は設計水深 h_d における浅水係数である。したがって、リーフ護岸の法線位置における換算沖波波高 H_0' は、リーフ縁で碎波した波がリーフ上を伝播する過程で再生しリーフ上護岸の法線位置で短周期波高 $H_{s1/3}$ が

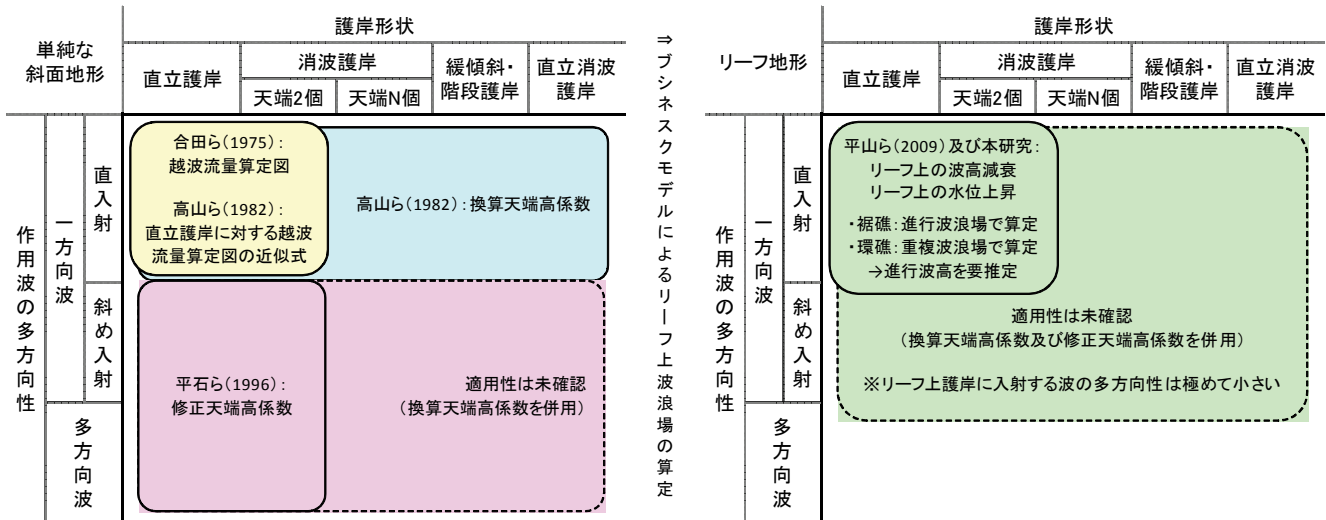


図-2.1 越波流量算定図に基づき拡張された護岸越波量推定法に対する本研究の位置づけ

得られたとき、その波は仮想的にはリーフ沖から来襲しリーフ内外で浅水変形したと考えた場合の沖波波高として捉えることができる。

ところで、本研究で対象とした那覇空港増設滑走路護岸に囲まれた空港島（以下、空港島と呼ぶ）は、広いリーフ地形上の比較的沖合に建設されるため、この設置によりリーフ上波浪場が分断されることになる。すると、このリーフ海域におけるサーフビート波高や平均水位上昇量の空間分布は空港島の有無により大きく異なることが予想されるため、裾礁上に設置される護岸を想定して提案された式(1)は、設計水位を必ずしも正しく推定できず、さらに式(2)による換算沖波波高の推定精度にも悪影響を及ぼす恐れがある。次章以降では、リーフ上護岸を対象とした場合のこのような適用条件と護岸越波量の推定精度との関係、及び適用範囲を拡張する上での課題等について詳しく述べることにするが、前章で挙げた越波流量算定図に基づきさまざまに拡張された護岸越波量推定法に対する本研究の位置づけについて、本研究成果を交えて予め整理すると概ね図-2.1のようである。

3. 対象リーフ海域における波浪変形特性

本章では、数値計算の手法、及びその結果得られた対象リーフ海域での波浪変形特性について述べる。

3.1 計算条件

本研究で対象とした那覇空港増設滑走路護岸の設計波浪諸元を算定するリーフ海域を図-3.1に示す。現在供用

中の那覇空港滑走路法線と増設滑走路法線との離隔距離は、1,310mである。護岸設計に用いる設計沖波には、図に示す9波向毎に波浪推算で得られた隣接する那覇港の設計沖波のうち、50年確率波（供用時）及び10年確率波（施工時）を用いた。また、設計潮位には、那覇港における設計高潮位（H.H.W.L.）、設計満潮位（H.W.L.）及び設計低潮位（L.W.L.）を用いた。これらの諸元をそれぞれ表-3.1及び表-3.2に示す。なお本研究では、このうち対象護岸における越波量が最も大きくなると予想される50年確率波、潮位H.H.W.L.におけるリーフ周辺の波浪変形特性について特に着目することとした。

これらの設計沖波に対するリーフ上波浪場の波浪変形計算には、島嶼による遮蔽効果を考慮しつつ計算の効率化を図るために、エネルギー平衡方程式法及びブシネススクモデルを組み合わせ用いた。すなわち、例として波

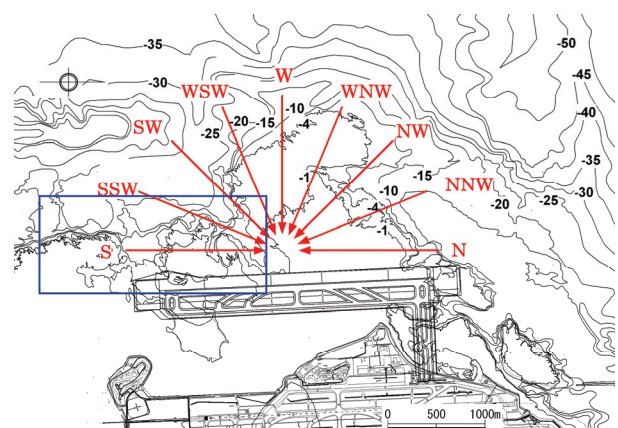


図-3.1 リーフ海域に建設される空港島

表-3.1 那覇港湾域における設計沖波

確率年	波向	波高H ₀ [m]	周期T ₀ [s]
50	S	12.27	16.19
	SSW	11.73	15.83
	SW	11.92	15.96
	WSW	10.48	14.96
	W	11.03	15.35
	WNW	10.66	15.09
	NW	10.12	14.71
	NNW	9.57	14.30
N	9.94	14.57	
10	S	8.86	13.76
	SSW	7.95	13.03
	SW	8.09	13.15
	WSW	7.63	12.77
	W	7.97	13.05
	WNW	7.55	12.70
	NW	6.92	12.16
	NNW	7.20	12.40
N	7.39	12.57	

表-3.2 那覇港湾域における設計潮位

設計条件	潮位
設計高潮位	H. H. W. L. =D. L. +3. 20m
設計満潮位	H. W. L. =D. L. +2. 10m
設計低潮位	L. W. L. =D. L. +0. 00m

向Wに対する波浪変形計算イメージを示した図-3.2からわかるように、リーフ周辺の波浪場の算定に用いるブシネスクモデルへの入射波には、その沖合で実施するエネルギー平衡方程式法を用いた波浪変形計算において、設計沖波諸元が再現された際にブシネスクモデルとの接続境界で算定される方向スペクトルを与えることとした。なお、エネルギー平衡方程式法で造波する沖波の方向スペクトルは、ブレッドシュナイダー・光易型スペクトルと光易型方向関数で表現されるものとし、方向集中度は $S_{max}=25$ とした。また、差分格子間隔は50mとした。

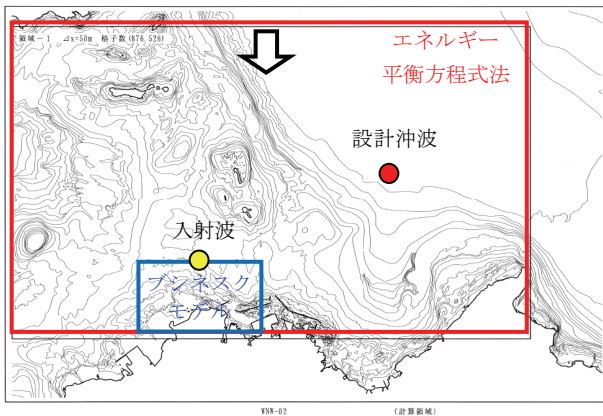


図-3.2 波浪変形計算のイメージ (例として、波向W)

リーフ上及びリーフ周辺の波浪変形計算には、複雑な海底地形上での波の砕波・遡上も考慮可能なブシネスクモデル (NOWT-PARI, Ver5.2) (平山・平石, 2004, 2005) を用い、差分格子間隔は5m, 差分時間間隔は有義波周期の約1/800とした。なお、対象リーフ海域への本計算モデルの適用性については、対象リーフ内を含む波浪場の現地観測データに対する再現計算結果 (平山ら, 2009) を参照されたい。

エネルギー平衡方程式法で算定された接続境界における任意形状の方向スペクトルの造波には、比較的少ない成分波数で長時間の不規則波形を造波できる平山・宮里 (2009) の方法を用いた。また、換算沖波波高の算定に必要な進行波の波高を各護岸法線位置で得るために、既設護岸などの前面には消波層 (スポンジ層) を配し、陸地等から反射波が生じないような境界条件を設定した。さらに、各護岸法線上とその沖50mには、100m間隔 (水深が深く波浪の影響が大きいと思われる箇所では50m間隔) で代表点を設けて水位変動の時系列データを出力し、ゼロ線からのシフト量に相当する平均水位上昇量を算出するとともに、ゼロアップクロス解析を行い進行波の波高を得た。さらに、ローパスフィルタを用いて分離された水位変動の長周期成分の時系列データに対して同様にゼロアップクロス解析を行い、サーフビート波高を得た。

3.2 計算結果

図-3.1に示す空港島のうち、四角枠で囲まれた空港島南側の護岸では、リーフ上波浪場の波浪変形計算結果より、波向W, WSW, SW及びSSWの沖波による作用が卓越することが確認された (図-3.3)。このうち、潮位H.H.W.L., 波向Wに対する有義波高・平均波向及び平均流速・平均水位の空間分布を図-3.4に示す。

図-3.4(a)より、リーフ切れ目を跨ぐ南側護岸付近では、リーフによる砕波減衰後の波が作用する中央部の護岸に比べ、波高の大きい波が作用することがわかる。ただし、このうち南側の護岸端部付近では、沖の浅瀬を通過した波の波高が低下している。一方、図-3.4(b)より、このとき同時に、周辺リーフ上の平均水位上昇をもたらした水塊が流れ込み、沖向きの強い流れが生じていることがわかる。したがって、図-3.4(a)では、これによりリーフ切れ目への波の進入が抑制され、局所的な波高低下が生じている状況も見てとれる。なお、これらと同じような傾向は、空港島の南側護岸で卓越する他の波向に対しても同様にみられた。

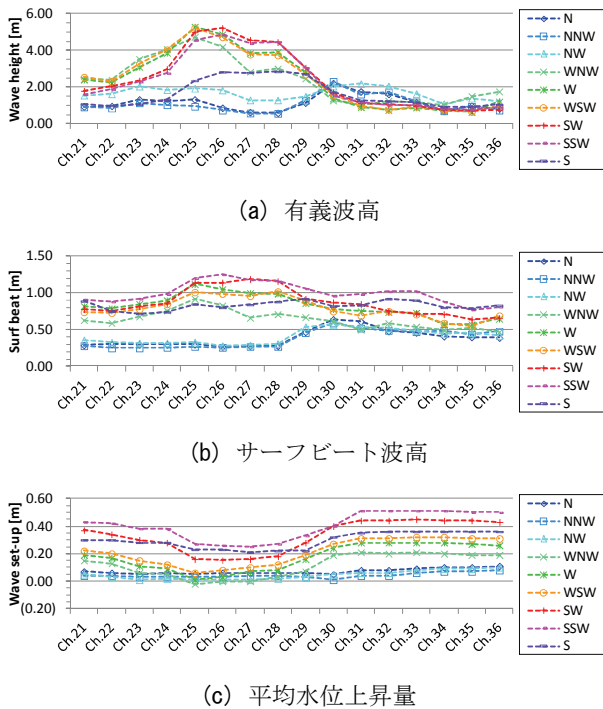


図-3.3 沖波の波向きによるリーフ上波浪場の違い (図のch番号が示す位置は、図-4.1を参照されたい)

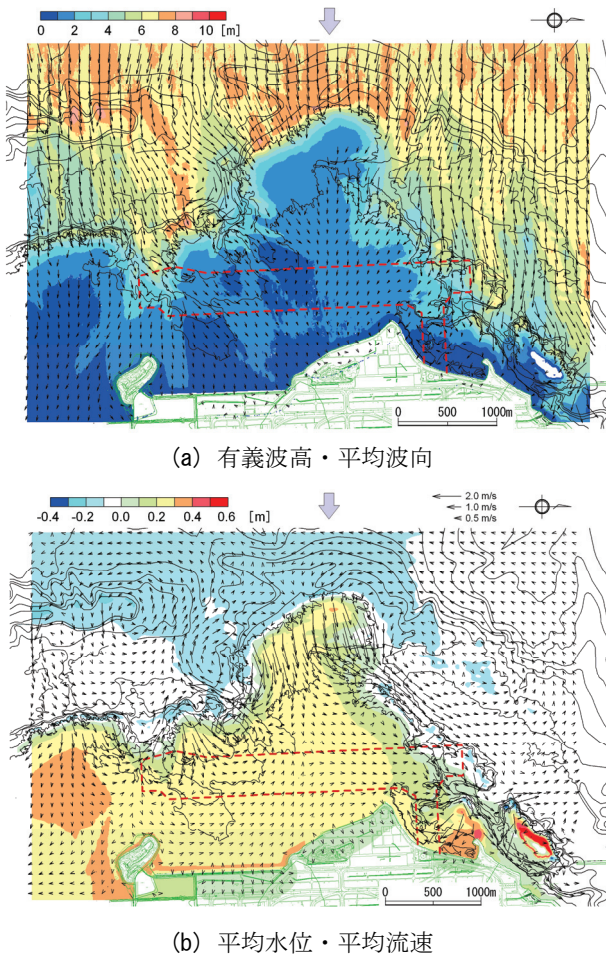


図-3.4 沖波の波向きによるリーフ上波浪場の違い

4. リーフ上護岸を対象とした平面越波実験

本章では、対象リーフ海域での波浪変形特性を踏まえて実施した平面越波実験について述べる。

前節で述べたリーフ切れ目を跨ぐ南側護岸を含む、図-3.1の四角枠で示す範囲のリーフ地形及び人工島護岸を対象として、2潮位（H.H.W.L., H.W.L.）及び卓越する4波向（W, WSW, SW, SSW）の多方向不規則波（2波群）に対する波浪変形実験及び護岸越波実験を実施した。平面水槽内に縮尺1/60で再現した海底模型を図-4.1に示す。なお、この水槽の長辺及び短辺のそれぞれ1辺ずつ及びこれらの隅角部には、サーペント型造波装置及び伸縮する連結板が設置されており、造波面に対し傾いた主波向きを有する多方向不規則波でも広い有効造波領域を確保することが可能となっている（Hiraishi et. al., 1998）。

4.1 波浪変形実験

図-4.1に示すCh番号は、波浪変形実験で設置した波高計位置であり、これらは上述の波浪変形計算で設定した代表出力地点に一致している。一方、この平面模型では南側護岸周辺の限られた範囲のリーフ地形しか再現できていない。そこで、造波諸元を決定する入射波検定では、前述の波浪変形計算のうち南側護岸で卓越する4波向に対して算定された護岸法線位置での波浪諸元を直接再現することを試みた。すなわち、越波に対して特に厳しい波浪条件となるリーフの切れ目付近の護岸法線（図-4.1に示すGS-2工区及びGS-3工区）近傍のCh21～32を対象として、計算波高（Cal）（＝造波目標波高）と計測波高（Exp）の差が最小となる造波諸元を、式(3)に示す重み付き最小2乗法により設定した。

$$\Delta H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i \{(H_{target})_i - H_i\}^2} \quad (3)$$

$$H_i = a_i x + b_i \quad (4)$$

ここで、 ΔH は目標波高に対する計測波高の誤差のRMS平均値（cm）である。また、 $(H_{target})_i$ は地点*i*における目標波高、式(4)に示す H_i はそれに対する（推定）計測波高である。さらに、 x は造波信号として入力した波高値であり、 a_i 、 b_i は入力波高と各地点での計測波高の分布に対して得られた回帰直線の傾き及び切片である。

一方、 α_i はその地点の検定重要度を示す重みであり、平面越波実験の精度を確保するための重要度、及び平面模型上で再現し得る波浪変形特性を踏まえ、より現実的な造波実験となるよう配慮して設定されたものである（表

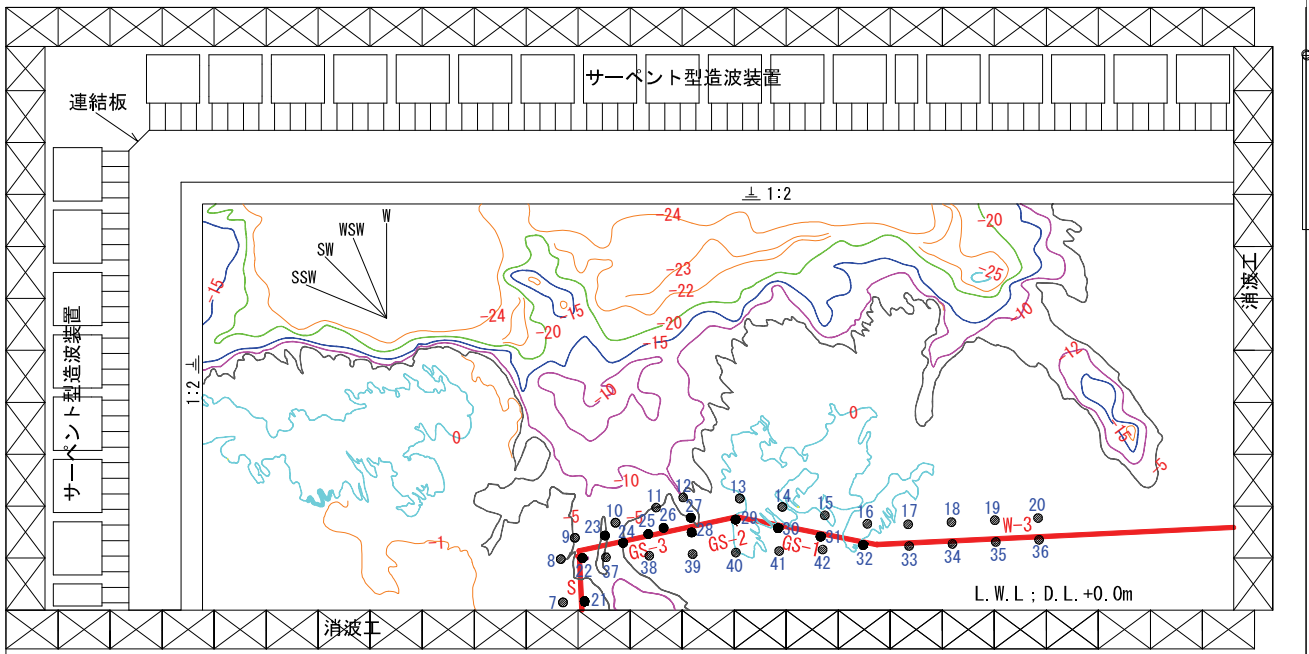


図-4.1 リーフ地形模型（縮尺：1/60）と波高計配置

表-4.1 最小2乗法による波浪検定に用いた各検定地点の重み

潮位	工区	S	GS-3								GS-2	GS-1	
H.H.W.L.	Ch番号	ch.21	ch.22	ch.23	ch.24	ch.25	ch.26	ch.27	ch.28	ch.29	ch.30	ch.31	ch.32
重み	波向W	0	0	0	0	0.2469	0.2469	0.0123	0.2469	0.2469	0	0	0
	波向WSW	0	0	0	0	0.4444	0.0444	0.0222	0.0444	0.4444	0	0	0
	波向SW	0	0	0	0	0.3175	0.3175	0.0159	0.0317	0.3175	0	0	0
	波向SSW	0	0	0	0	0.0278	0.2778	0.1389	0.2778	0.2778	0	0	0

潮位	工区	S	GS-3								GS-2	GS-1	
H.H.W.L.	Ch番号	ch.21	ch.22	ch.23	ch.24	ch.25	ch.26	ch.27	ch.28	ch.29	ch.30	ch.31	ch.32
重み	波向W	0	0	0	0	0.2222	0.2222	0.1111	0.2222	0.2222	0	0	0
	波向WSW	0	0	0	0	0.4444	0.0444	0.0222	0.0444	0.4444	0	0	0
	波向SW	0	0	0	0	0.0278	0.2778	0.1389	0.2778	0.2778	0	0	0
	波向SSW	0	0	0	0	0.0278	0.2778	0.1389	0.2778	0.2778	0	0	0

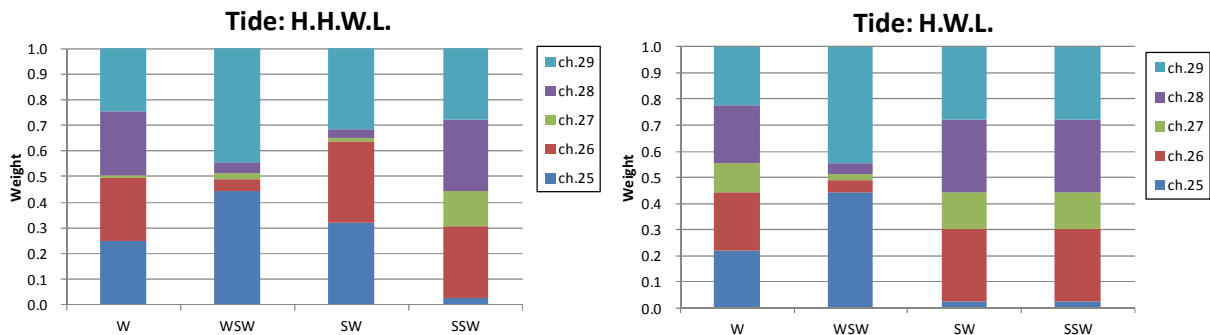


図-4.2 最小2乗法による波浪検定に用いた各検定地点の重み

-4.1及び図-4.2). なお、これらの重みは総和が1になるよう正規化されている。また、nは入射波検定に用いた波高計（Ch21～32）の総数で、n=12である。これらの重みは、具体的には次のように設定した。

まず、最も激しい越波が予想されるGS-2工区とGS-3工

区での実験精度を重視するため、S工区（Ch21）及びGS-1工区（Ch30-32）の重みはゼロとし、ここでの誤差は検定に考慮しないこととした。また、リーフの切れ目に当たり、背後のリーフ地形が考慮されていない平面模型実験では目標波高の再現が困難と判断されたGS-3工区の西側

端部（Ch22-24）の重みも同様にゼロとした。何故なら、波浪変形計算で得られたこの付近の目標波高は、平面模型実験では再現されない背後を含む周辺リーフ地形からの沖向きの強い流れの影響を受けて変化していると推測されたためである（図-3.4）。なお、空港護岸設置後の現地（及びこれを再現できるであろう波浪変形計算）では、リーフ内からの流れは遮蔽されるため、この場合には平面模型実験と同様な波浪場が形成されると思われる。さらに、他の検定点に比べ護岸法線より少し沖側に位置するCh27の重みは、護岸法線上の他の地点に比べ、相対的に1/2に抑えることとした。

次に、上記の結果、ゼロより大きな重みが設定されるCh25-29について、それらの値は、入射波の波向に応じて次のように設定した。波向WではCh27を除いて均等に設定するとともに、沖向き流れが卓越するH.H.W.L.時にはさらに1/10に減じた。波向WSWでは両潮位時に沖向き流れが卓越し、そのためCh26-28で目標波高が過小となっているため、これらの重みを他の地点に比べ1/10に減じた。さらに、波向SW及びSSWでは、この沖向き流れの影響が西側に移動するためCh25の重みを1/10に減じたが、波向SWのうち潮位H.H.W.L.では、この影響よりもCh27-28付近のリーフ切れ目で発生する沖向き流れの影響がより卓越するため、これらの重みをそれぞれ1/10に減じた。なお、このように設定した結果、波向WSW及び波向SSWに対する重み分布は、潮位によらず共通である。

各波浪条件において、入力波高に対する ΔH が最小となるように設定した各ケースの造波諸元を、沖波諸元とともに表-4.2に示す。なお、入力波高に対する ΔH の変化を付録Aに示す。ここで、設計沖波における方向集中度 $S_{max}=25$ に対し、造波位置に至るまで主波向は変化しないものと仮定した。また、本実験に用いた造波装置の造波限界は有義波高で14cm程度であるため、設定する入射波高はこれを上限とした。

表より、検定後の造波諸元により得られた各対象地点の計測波高の平均誤差（RMS誤差）は、各ケースとも入力波高の3～7%以内に収まっていることが確認できる。

表-4.2 各実験ケースの造波諸元

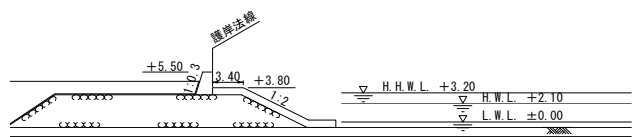
潮位	設計沖波 (50年確率波)				造波諸元				RMS誤差 [m]		RMS誤差 / 入力波高 [%]	
	波向	波高 [m]	周期 [s]	波群1	波群2	入力波高 [m]	周期 [s]	主波向 [deg]	Smax	波群1	波群2	波群1
H.H.W.L. (D.L.+ 3.2m)	W	11.0	15.5	8.4	8.4	15.3	0.0	15	0.20	0.19	2.4%	2.3%
	WSW	10.5	14.7	6.4	6.4	14.9	22.5	29	0.43	0.40	6.7%	6.2%
	SW	11.9	16.3	8.4	8.4	16.0	45.0	18	0.24	0.19	2.9%	2.2%
	SSW	11.8	15.5	8.4	8.4	15.8	67.5	20	0.29	0.38	3.5%	4.6%
H.W.L. (D.L.+ 2.1m)	W	11.0	15.5	7.7	7.9	15.3	0.0	16	0.30	0.28	3.9%	3.5%
	WSW	10.5	14.7	6.3	6.4	14.9	22.5	32	0.29	0.25	4.7%	3.9%
	SW	11.9	16.3	8.4	8.4	16.0	45.0	19	0.25	0.28	3.0%	3.4%
	SSW	11.8	15.5	8.4	8.4	15.8	67.5	21	0.34	0.34	4.0%	4.0%

4.2 平面越波実験

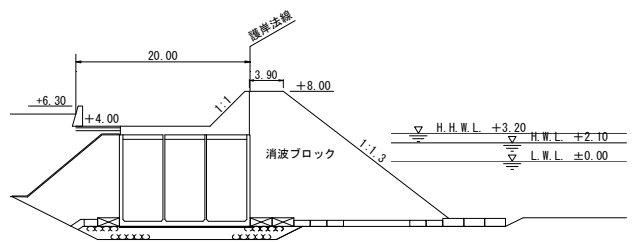
海底模型上に図-4.1に赤線で示すW-3工区（延長384m）、GS-1工区（延長330m）、GS-2工区（延長74m）、GS-3工区（延長371m）及びS工区（延長100m）の護岸模型を設置し、これらの護岸における平均越波量の空間分布を計測した。ここで、例としてW-3工区及びGS-3工区の標準断面図を図-4.3に示す。ただし、これらはあくまで本実験で検討対象とした断面であり、実際に施工される断面とは異なる可能性があることに留意されたい。

護岸越波量は、導水板により約48m間隔で仕切られた越波マスを護岸背後の空港用地内に設置して計測し、計測時間内に貯留された越波量（ m^3 ）を護岸法線に沿った導水板の間隔（m）及び計測時間（s）で割り戻すことにより、単位幅あたりの平均越波量（ $m^3/s/m$ ）を算定した。越波マスの平面配置を図-4.4(a)に示す。なお、計測時間は造波開始後、水槽内の波浪場が安定するまでの約3分間を経た後の約250波分とした。

一方、越波実験時の波高計配置は基本的に図-4.1と同様であるが、波浪変形実験時には空港島用地に当たるリーフ上に設置した波高計のうちCh39～42は、護岸パラペット背後の越波排水路内に移設し、排水路内の水位を計測することとした。また、Ch38は排水口に設置し、越波時には排水路内の段落ち水位とこれを上回る排水口外側の波による水位を同時に計測した。さらに、Ch37は、波浪変形実験時にはGS-3工区の護岸法線近傍に設置した波高計Ch22～28とともに、GS-2～GS-3工区に設置した越波マスの間隔に合わせて護岸法線上に移設し、護岸上の越流水深を計測して、越流公式に基づく護岸越波量の推定を試みた。越波実験時の波高計配置を図-4.4(b)に示す。



(a) W-3工区



(b) GS-3工区

図-4.3 対象とした護岸断面図

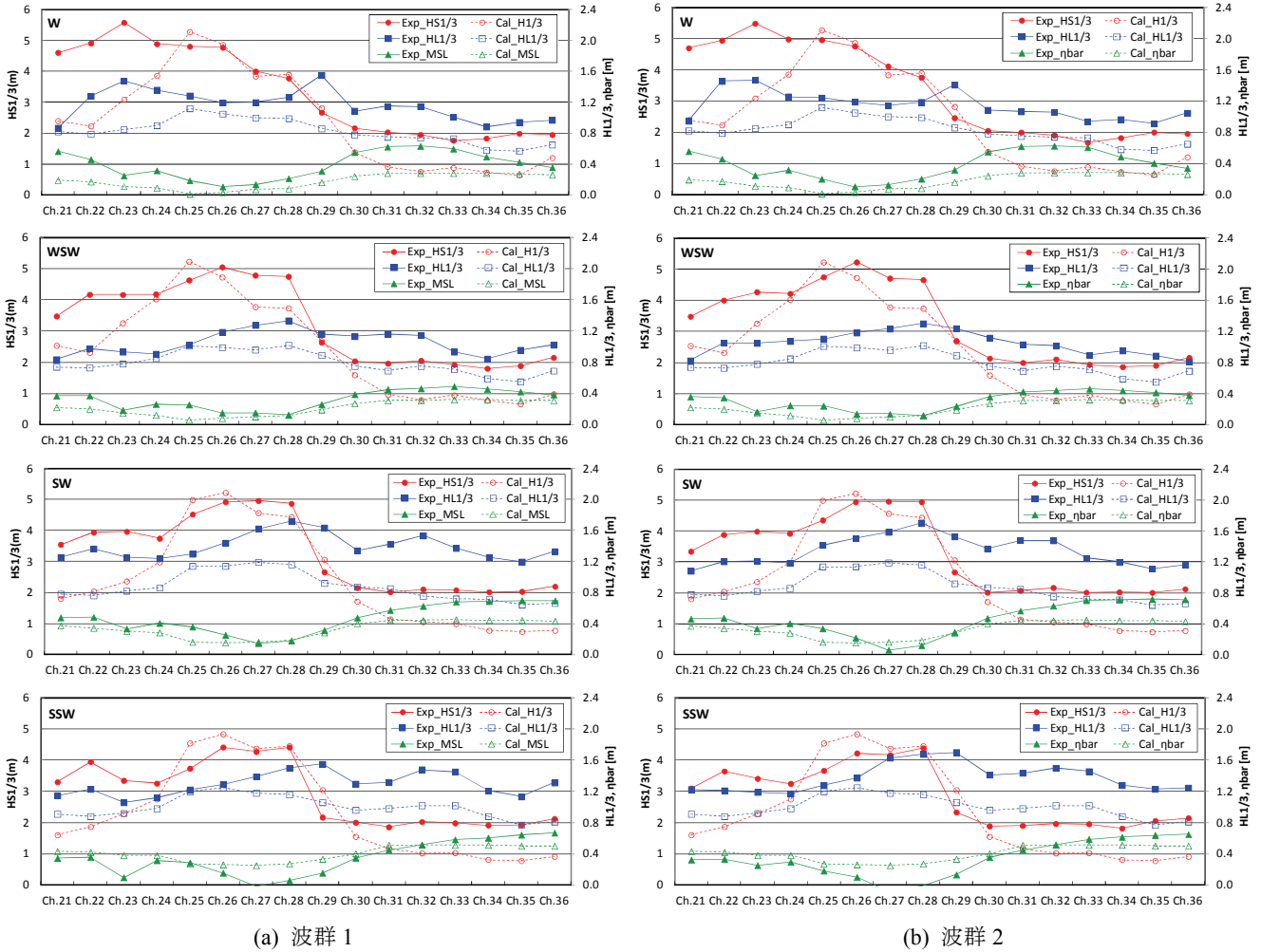


図-5.1 リーフ上の波浪統計量 (Exp : 実験結果と Cal : 計算結果の比較)

したこと、リーフ上に位置するCh30~36では $H_{L1/3}$ 及び η_{bar} が局所的に増大して砕波が生じにくくなったこと、がそれぞれ原因と考えられる。なお、Ch21~23では、W側の波向きほど、波浪変形計算においても考慮された沖の浅瀬による波高減衰を考慮できていないことにも注意が必要である。

また、Ch30~36において、実験で得られた $H_{L1/3}$ 及び η_{bar} が計算に比べ全体的に大きくなった直接の原因は、海底模型岸側の水槽壁からの反射や閉鎖によるものと思われる。したがって、この影響は波向き毎に少しずつ異なり、特にリーフ上のW-3工区 (Ch33~36) では、波向きがS側に傾くほど、この傾向が強くなる。

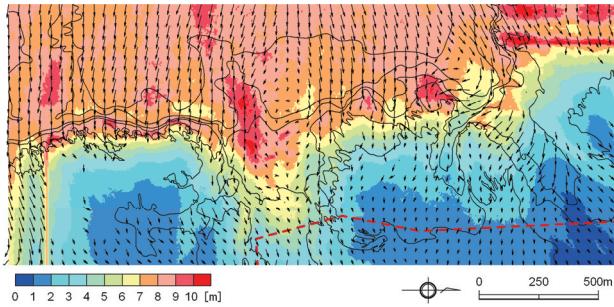
ここで、これらの状況を確認するために、波向Wを対象として、図-4.1に示す範囲で実施した波浪変形実験の再現計算結果を図-5.2に示す。また、各地点で得られた波浪統計量を比較した結果を図-5.3に示す。

図-5.3では、いずれの統計量 ($H_{S1/3}$, $H_{L1/3}$, η_{bar}) とも、

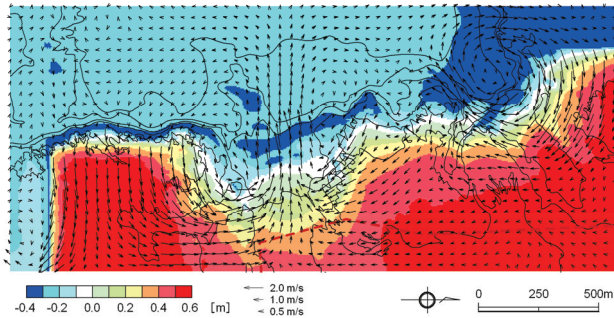
再現結果 (Bsq) は実験結果 (Exp) を比較的よく再現している。一方、図-5.2でみられるリーフ切れ目での流路幅200m程度の冲向き流れとそれによる波高変化は、実験時の状況をよく説明する。しかし、これらは、同じ計算モデルを用いCalを得た図-3.4の状況とは異なるため、図-5.3におけるCalとExpの差の多くも、海底模型周辺で生じる波浪変形の違いによるものであることが推測される。ただし、同じ海底地形を対象としたExpとBsqで一部にみられる違いは、ブシネスクモデルにおける砕波変形及びそれによる流れの計算精度に未だ改善の余地が残されていることを示唆している (宇野・平山, 2012 ; 2013)。

5.2 リーフ上護岸越波量の推定精度

前節の波浪変形実験と同様に、検定後の造波諸元を用い、護岸模型を設置して実施したリーフ上護岸の平面越波実験のうち、潮位H.H.W.L., 波群2に対して計測された護岸越波量をその推定結果とともに図-5.4に示す。

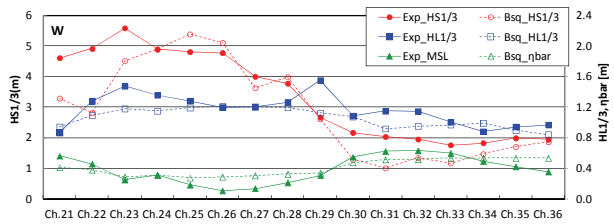


(a) 有義波高・平均波向 (Bsq: ブシネスクモデル)

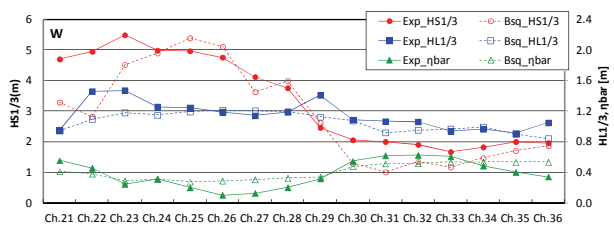


(b) 平均水位・平均流速 (Bsq: ブシネスクモデル)

図-5.2 平面波浪変形実験の再現計算結果



(a) 波群 1



(b) 波群 2

図-5.3 再現計算における波浪統計量の再現性 (Exp: 実験結果, Bsq: ブシネスクモデルの計算結果)

図は上から、波向W, WSW, SW及びSSWの結果であり、各図には、平山ら (2009) の方法にならない図-5.1に示す計算結果から推定したもの (Cal), 同様に図-5.1に示す実験結果から推定したもの (Exp), 護岸模型前面 (重複波浪場) で計測された設計潮位から推定した護岸越波量 (Exp2), 及び護岸模型を設置して実際に計測したもの (Mes), をそれぞれ H_0 で無次元化したものを重ねて示した。ここで、各集水マスで計測した単位幅平均越波流量 q

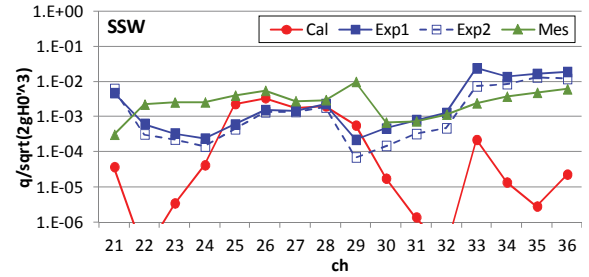
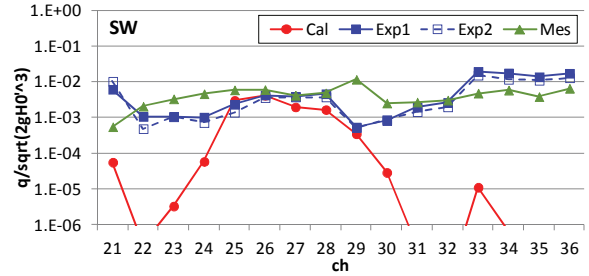
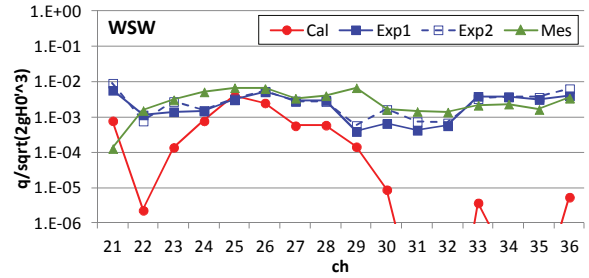
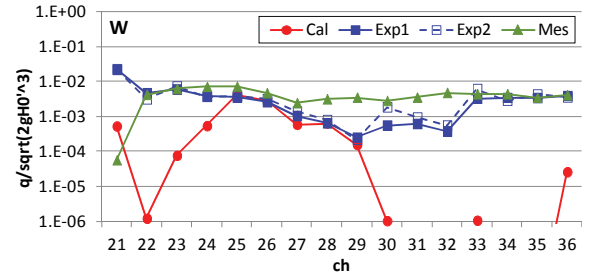


図-5.4 計測・推定されたリーフ上護岸越波量の比較

(Cal: 図-5.1に示す波浪諸元の計算結果から推定した護岸越波量, Exp: 図-5.1に示す波浪諸元の実験結果から推定した護岸越波量, Exp2: 護岸模型前面 (重複波浪場) で計測された設計潮位から推定した護岸越波量, Mes: 護岸模型上に設置した越波マスで実際に計測した護岸越波量)

は、図-4.1に示す最寄りのCh番号に振り分けた。また、無次元化に用いた H_0 には図-5.1に示す実験結果から推定したものをを用いた。なお、前面消波されたGS-2~GS-3工区については換算天端高係数を0.8, その他の直立護岸については1.0とした。また、背後に越波排水路が設けられたGS-2~GS-3工区については、前面の護岸パラペット上からの越波量のみを対象とした。

以下では、Mesに対する比較を行い、CalやExp, Exp2

による推定精度について考察する。なお、式(1)の適用に際し、実験 (Exp) で得られた $H_{L1/3}$ 及び η_{bar} には、前述のように水槽壁による反射や閉鎖の影響が含まれていると考えられるが、ここでは計算結果と同様、進行波に対する量とみなした。また、護岸模型を設置した越波実験 (Exp2) における $H_{L1/3}$ 及び η_{bar} は重複波浪場で計測されたものであるため、式(1)の適用に際し、 $b=1.0$ ($H_{L1/3}$ は重複波高)とした。さらに、式(2)の適用に際しては、Cal, Exp, Exp2ともに、進行波としてそれぞれ算定、計測された $H_{S1/3}$ を用いた。

まず、表-4.2に示した検定精度 (RMS誤差) を反映してCalとExpが比較的良好一致したCh24~29では、いずれの波向きともに、実際に越波量を計測したMesとも比較的良好一致した。またExpについては今回の場合、水槽壁が人工島護岸と同様、背後の広いリーフから対象海域を分断する役割を果たしたため、概してほぼすべての地点でExp2との違いは小さく、Mesとも比較的良好一致している。したがって、平山ら (2009) によるリーフ上護岸の越波流量推定法は、宮国ら (2008) と同様、少なくとも護岸法線上の設計波浪諸元が正しく得られる場合には、ある程度の妥当性を有しているといえる。

ただし、ExpとMesの比較において、より詳細には、波向きがS側へ変化するにつれて、リーフ上のW-3工区 (Ch33~36) では、Mesに比べExpが次第に過大評価となっている。これは、進行波とみなした実験結果の $H_{L1/3}$ に含まれる、水槽壁による反射の影響が次第に大きくなったためと推測される。なお、この考察の妥当性については、重複波浪場で計測された $H_{L1/3}$ を用いたExp2がMesにより近づくことから確認できる。また、Ch21 (S工区) において、W側の波向きほどExp及びExp2が過大評価となる理由は、越波流量推定図の適用に際し、波向きによる補正を省略したためと考えられる。一方、このときMesに比べExp及びExp2が過小評価となる区間がGS-1工区 (Ch29~32) からGS-3工区南側 (Ch22~24) へ移っているのは、護岸設置時 (Mes) には図-4.1に示す護岸法線形状に応じて設計水深が増大するにもかかわらず、Exp及びExp2ではこれによる進行波高 (及び換算沖波波高) の増大が考慮されていないためと考えられる。

次に、護岸設置による波浪場の変化が顕著な場合には、進行波の計算結果から算定されるCalはMesを再現できないことが明らかとなった。すなわち、護岸設置後には、リーフ切れ目に位置するCh21~23では換算沖波波高が増大し、リーフ上に位置するCh30~36では設計水位が上昇することをそれぞれ推定できなかったために、Calはかなりの過小評価となった (ただしCh21~23では、

沖の浅瀬による波高減衰が考慮されないMes (及びExp, Exp2) はその分だけ過大であった可能性もある)。

したがって、これらの場合には、護岸設置後のリーフ上の波・流れ場を直接算定する必要があることが示唆された。すなわち、特に背後に広いリーフが続く護岸前面で式(1)を適用する際には、護岸の有無を考慮した η_{bar} 、及び長周期波の重複波高に当たる $bH_{L1/3}$ を直接算定できるように、護岸を設置した海底地形に対して波浪変形計算を行うべきである。しかし、この際には、換算沖波波高の算出に用いる護岸前面の入射波高 $H_{S1/3}$ を、何らかの方法で適切に見積もる必要がある。具体的には、例えば、護岸による波の反射率 Kr が既知の場合には、反射面から1波長程度沖で安定する重複波高に対し、 $(1+Kr^2)^{1/2}$ で除して護岸法線上の進行波高に換算することなどが考えられる。

5.3 越波排水路による護岸越波量の低減効果

図-4.3(b)、図-4.4及び写真-4.1からわかるように、GS-2工区及びGS-3工区では、後壁背後の空港用地へ流入する越波量を低減させるために、護岸パラペット背後に約20m幅の越波排水路が設けられている。越波排水路による越波量の低減効果は、例えば、関西国際空港の人工島護岸を対象に実施した平面実験結果 (南・平石, 2007; 齋藤・平石, 2008) などに見ることができる。しかし、これらの実験における排水路床は透水性とされたため、排水路内の水位が後壁上の越波量に与える影響などについては不明である。一方、本実験で対象とした那覇空港増設滑走路護岸では排水路床を不透過とし、路床勾配0.4%とした排水路の端部で越波水塊を堤外に排水する構造が採用されている。そこで本節では、このような越波排水路による護岸越波量の低減効果について、流路方向の各地点における排水容量の余裕高との関係に着目して考察する。

GS-2~GS-3工区に設置した各越波マス (図-4.4(a)のうちGS-2-1~GS-3-6) で計測された護岸パラペット上及び後壁上の時間平均越波量の比 (=越波排水路による護岸越波量の低減率) について、排水路内の代表地点 (図-4.4(b)のうちCh42~39) における水位に対する排水路深さの余裕高の割合とともに、図-5.5に示す。ここで、排水路深さとは、後壁天端 (D.L.+6.3m) から排水路内の各地点における路床高さ (Ch42 : D.L.+5.4m, Ch41 : D.L.+5.1m, Ch40 : D.L.+4.7m, Ch39 : D.L.+4.4m) までの差であり、各護岸断面で後壁高さ (及び排水路幅) は同じであるため、下流側ほど排水路深さは深くなっている。なお、排水路内水位は、横流入 (護岸パラペットからの

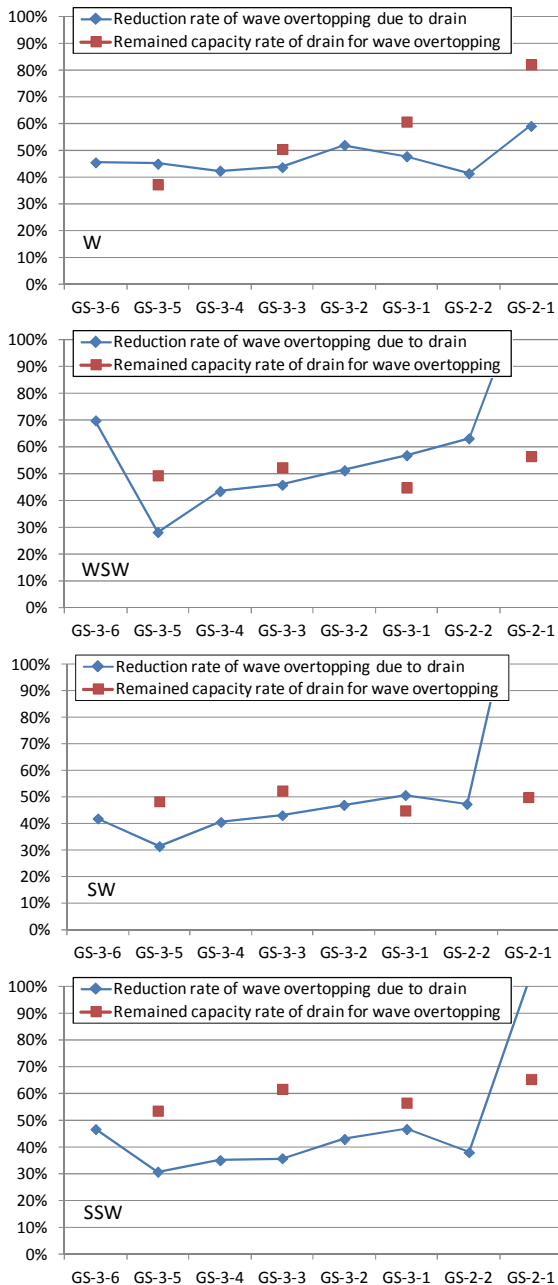


図-5.5 護岸越波量の低減率と排水路余裕高の割合

- (◆: 越波排水路による護岸越波量の低減率)
- (■: 排水路深さに対する余裕深さの割合)

越波), 横流出(後壁からの越波), 及びこれらにより不定流となった排水路内流れの上・下流側の影響を受けて時間的に変動するが, 本研究ではこれを時間平均した値のみに着目した。

図より, いずれの波向とも, 排水路背後の後壁上の越波量は, 護岸パラペット上の越波量の概ね 30~60%程度に低減している。しかし, これらの低減率は, 排水路幅が広いにもかかわらず, 南・平石(2007)や齋藤・平石

(2008)が示した1~10%に比べてかなり大きく, 護岸越波量の低減効果はかなり限定的であることが伺える。これは, 排水路床を透水性とした場合とは異なり, 排水路床を不透過とした本実験では, 排水路深さが浅いほど, 護岸パラペットから排水路へ流入した越波水塊が排水路床で飛び跳ね, 背後の後壁から流出し易くなっているためと考えられる。各波向とも, 排水路深さが浅い上流側ほど護岸越波量の低減率の値(=横流入量に対する横流出量の割合)が概ね大きくなっているのはこのためである。なお, 特にS系の波に対し, 越波排水路の上流端に近い越波マスGS-2-1で後壁からの越波量が護岸パラペット上の越波量を上回った原因は, 隣接するGS-1工区護岸からの越波量も一部含まれているためと考えられる。

また, 排水路床を不透過とした場合には, 排水路内で有意な水位が保たれることにも十分留意する必要がある。すなわち, 排水路内の水位が上昇し, これを考慮した排水路深さに対する余裕深さの割合が小さくなるほど, その前面の護岸パラペットを越波して流入する水塊を下流へ排水しにくくなり, 背後の後壁からの越波量が増加する(護岸越波量の低減率の値が大きくなる)ことが懸念される。特に, 水位に対する排水路の余裕深さが下流側ほど小さくなっている波向Wでは, 排水路に流入した越波水塊により押しつけられた排水路内の流量が後壁から流出するために, 排水路深さが深い下流側でも護岸越波量の低減率の値が大きく, 排水路による護岸越波量の低減効果が減少することに注意が必要である。

したがって, 越波排水路による十分な護岸越波量の低減効果を期待するためには, 十分な排水路深さを確保するだけでなく, 排水路内の水位をできるだけ低く保つことが重要であることがわかった。例えば, 排水路内水位の上昇に伴う余裕深さの減少を, 排水路深さに対し50%程度に抑えることができれば, 越波排水路により護岸越波量を30~50%程度に低減できると思われる。

なお, 越波排水路による護岸越波量の低減効果について, より詳細には, 1波毎の越波水塊の挙動を考慮した排水路内の不定流解析を行い明らかにする必要がある。このために必要な境界条件のうち, 護岸パラペットからの越波量の時間変化は, Ch22~28及びCh37で計測された水位変動から得られる越流水深を, 越流係数を調整した越流公式に当てはめて推定できる。また, 後壁からの越波量の時間変化は, これに各区間での護岸越波量の低減率を乗じて推定できるものと仮定する。さらに, 排水路下流端の水位の時間変化はCh38で与えられるので, 排水路内の代表地点Ch39~42で計測された水位変動データを再現目標とした不定流解析を行うことにより, その

他の工区における排水路内水位や下流端からの排水量の時間変化を推定することができると考えられる。今後、越波排水路による護岸越波量の低減効果を定量化するためには、このような面的防護の考え方が不可欠である。

6. まとめ

本研究では、平山ら（2009）が提案したリーフ上護岸の越波流量推定法の妥当性について、平面水槽を用いた波浪変形実験及び平面越波実験を行い検証した。

その結果、リーフ上護岸の越波流量推定法は、護岸法線上の設計波浪諸元が正しく得られる場合にはある程度の妥当性を有しているものの、進行波の波浪変形計算のみで正しい設計波浪諸元が得られない場合には、護岸を設置した計算も行う必要があることが明らかとなった。ただし、この場合には換算沖波波高の算定に必要な進行波高の見積もりに未だ課題が残されている。

また、越波排水路を有する護岸越波量の計測結果より、排水路内の水位が低く保たれている場合に護岸越波量の低減効果が期待できることを確認した。しかし、より詳細には、本実験で得られた境界条件を活用した排水路内の不定流解析を行い、面的防護の考え方を踏まえて定量化する必要があることが示唆された。

7. おわりに

本研究では、設計波の算定や設計断面における護岸越波量の推定、及び平面模型実験によるそれらの精度検証という那覇空港増設滑走路護岸の設計にかかる一連の検討を通じて、平山ら（2009）により提案されたリーフ上護岸の越波流量推定手法の妥当性を検証した。今後実施されるリーフ上護岸の設計において本手法を適用する場合には、本研究で得られた知見が広く活用されることを期待するものである。

また、空港島や景勝地の護岸のように、高さを制限される護岸では、越波排水路による越波量の低減効果を積極的に見込んだ護岸断面が提案される機会が増えることも想定される。この場合には、排水路内水位が護岸越波量の低減効果に及ぼす影響にも十分留意されることを願うものである。

今後は、リーフ上護岸周辺の波浪変形計算において直接、護岸越波量を算定する試み（平山・長谷川，2011）も引き続き行う予定である。また、排水路内の不定流解析等を通じて、越波排水路による護岸越波量の低減効果を面的に定量把握する手法の開発についても、引き続き

取り組んでいきたいと考えている。

(2014年1月24日受付)

謝辞

本稿の執筆に用いた波浪変形計算結果、平面模型実験結果の取得に当たってはそれぞれ、(株)日本港湾コンサルタント関西支社の田中和広氏、(株)エコー水理解析部の宮里一郎氏にご尽力いただいた。また、越波排水路を有する護岸越波量データのとりまとめに当たっては、H25年度波浪研究チーム夏季実習生の中根滉太君（福島工業高等専門学校建設環境工学科4年）による実習成果を参考にさせていただいた。ここに記し、関係各位に対し謝意を表します。

参考文献

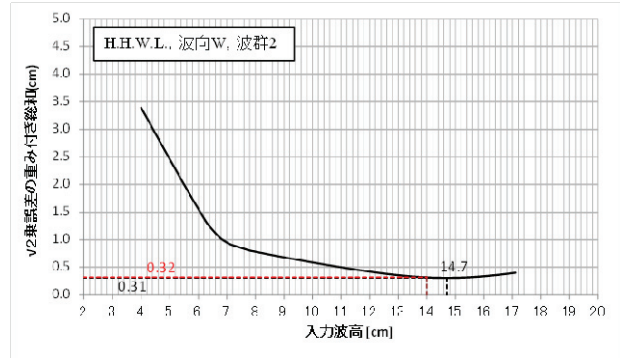
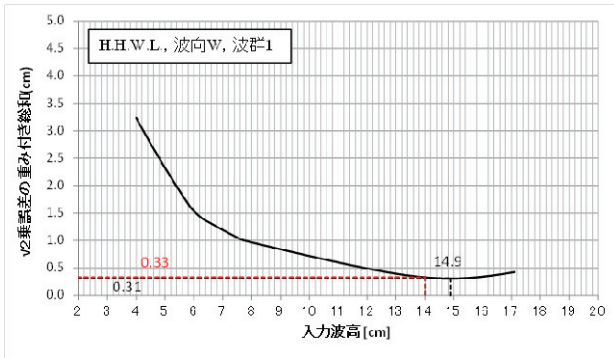
- 宇野喜之・平山克也 (2012): 乱れの生成・逸散過程に着目した砕波モデルの計算精度に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-68, No.2, pp.1_26-1_30.
- 宇野喜之・平山克也 (2013): ブシネスクモデルによる砕波帯内波・流れ場の推定精度の向上に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-69, No.2 (投稿中).
- 川崎浩司・菊 雅美・舟橋 徹 (2009): 直立護岸越波に及ぼすリーフ形状と波浪諸量の影響について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.751-755.
- 合田良実・岸良安治 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, 第14巻, 第4号, 44p.
- 齋藤英治・平石哲也 (2007): 越波吸収型護岸の越波量低減効果に関する模型実験, 港空研資料, No.1178, 18p.
- 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, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205.
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榎本達也 (1996): 護岸越波量における波の多方向性の影響, 港研報告, 第35巻, 第1号, pp.39-64.
- 平山克也, 平石哲也 (2004): ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.11-15.
- 平山克也・平石哲也 (2005): 平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用, 海工論文集, 第52巻, pp.11-15.
- 平山克也・宮里一郎 (2009): 任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案, 港空研報告, 第48巻, 第2号, pp.199-214.
- 平山克也・春尾和人・宮里一郎 (2009): ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する

- る考察, 港空研報告, 第 48 卷, 第 3 号, pp.23-74.
- 平山克也, 長谷川巖 (2011): ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 特集号, Vol.67, No.2, pp.I_262-I_267.
- 宮国敏秋・又吉昭太・仲座栄三・宇座俊吉 (2008): リーフ上の護岸越波に関する研究, 海洋開発論文集, 第 24 卷, pp.951-955.
- 南 靖彦・平石哲也 (2006): 空港島護岸の越波量低減法に関する模型実験, 港空研資料, No.1158, 21p.
- Hiraishi, T., K., Hirayama and H., Maruyama (1998): Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.37, No.4, pp.3-35.

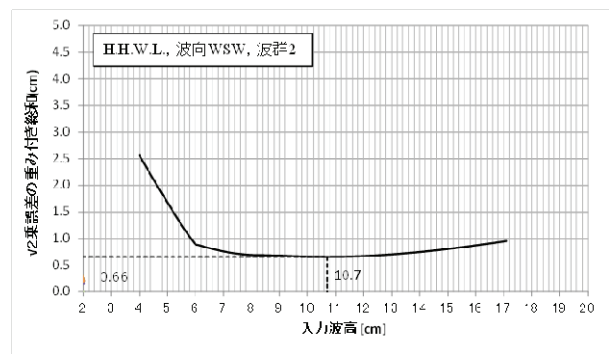
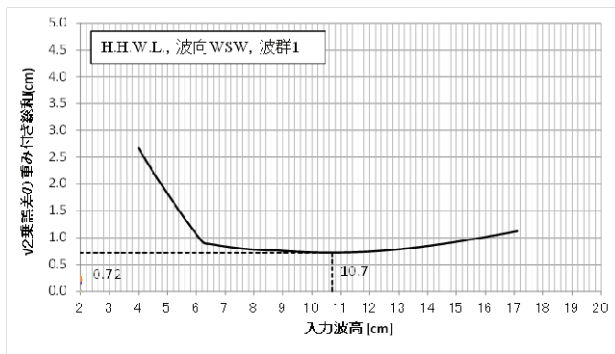
記号表

a	: サーフビート波高に対する波峰高の割合
a_i	: 地点 <i>i</i> における回帰直線の傾き
b	: 進行波高に対する護岸前面波高の増幅率
b_i	: 地点 <i>i</i> における回帰直線の切片
h	: 静水深 (m)
h_c	: 護岸天端高 (m)
h_d	: 設計水深 (m)
H_0	: 沖波波高 (m)
H_0'	: 換算沖波波高 (m)
H_i	: 地点 <i>i</i> における計測波高 (cm)
$H_{L1/3}$: 長周期波 (サーフビート) の有義波高 (m)
$H_{S1/3}$: 短周期波 (風波) の有義波高 (m)
H_{target}	: 地点 <i>i</i> における目標波高 (cm)
K_s	: 浅水係数
q	: 単位幅あたりの時間平均越波流量 ($m^3/s/m$)
n	: 最小二乗法で対象とする地点数
S_{max}	: 方向集中度
T_0	: 沖波周期 (s)
$T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
x	: 造波信号として入力した波高値 (cm)
α_i	: 最小二乗法における重み
ΔH	: 計測波高の誤差のRMS平均値 (cm)
η_{bar}	: 平均水位上昇量 (m)
θ	: 波向き (deg)

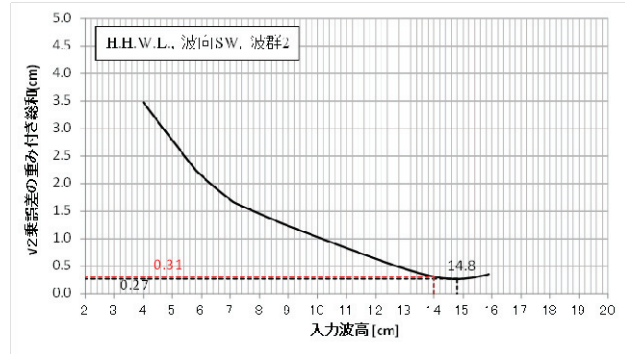
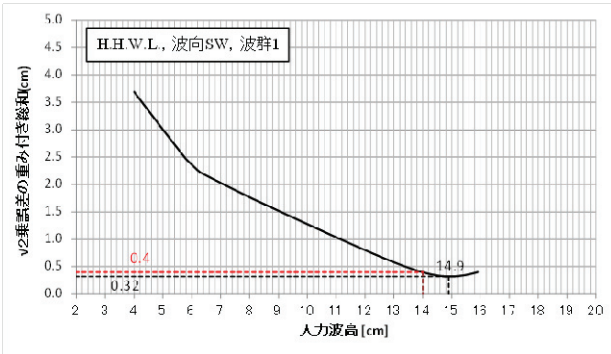
付録A 波浪変形実験における波浪検定結果



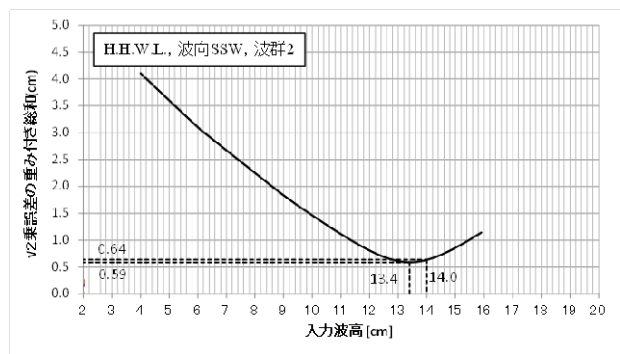
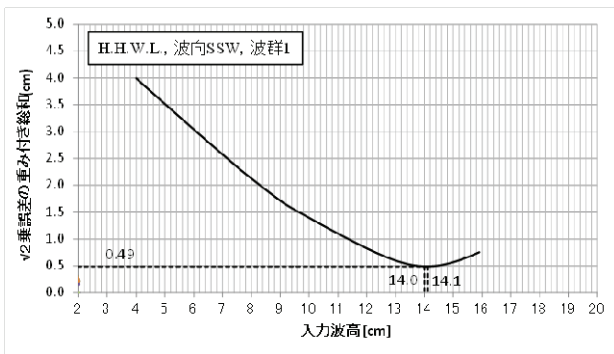
(a) 波向W



(b) 波向WSW

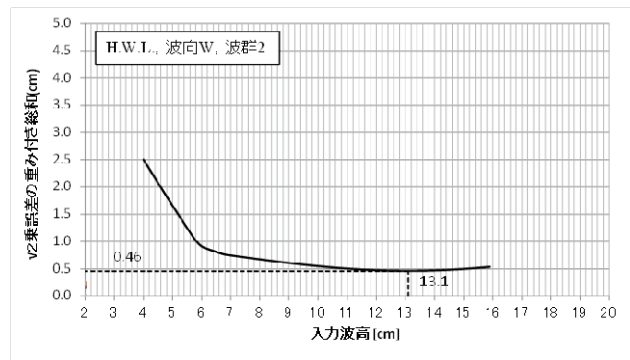
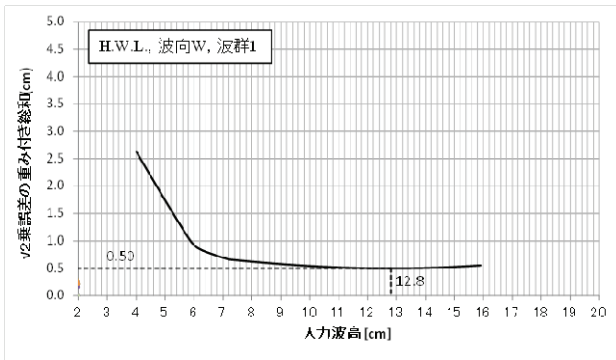


(c) 波向SW

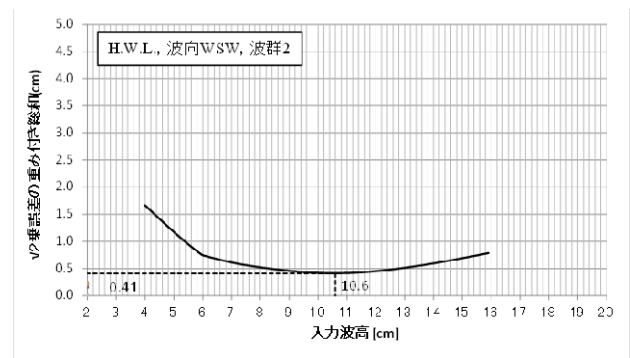
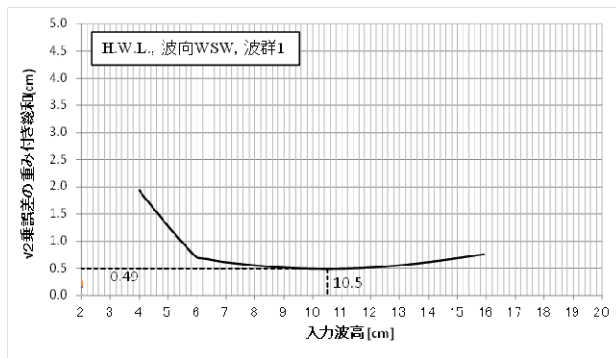


(d) 波向SSW

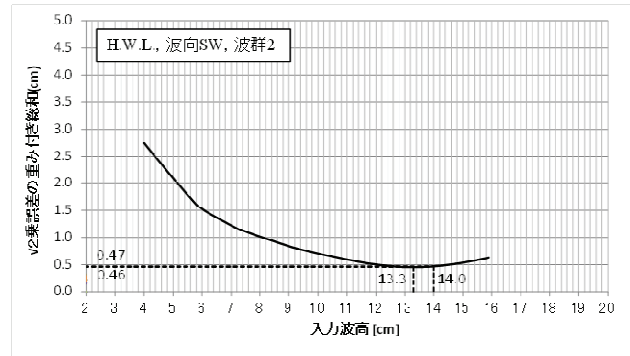
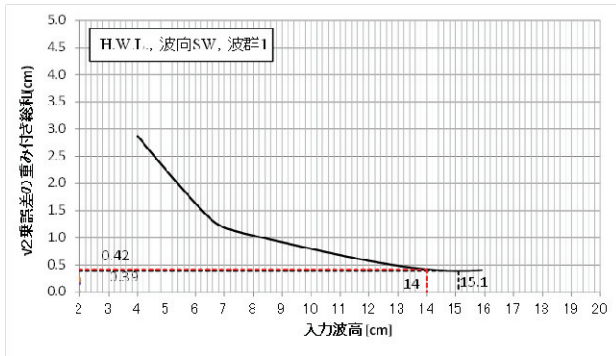
図-B.1 入力波高に対する目標波高の再現誤差の変化 (潮位H. H. W. L.)



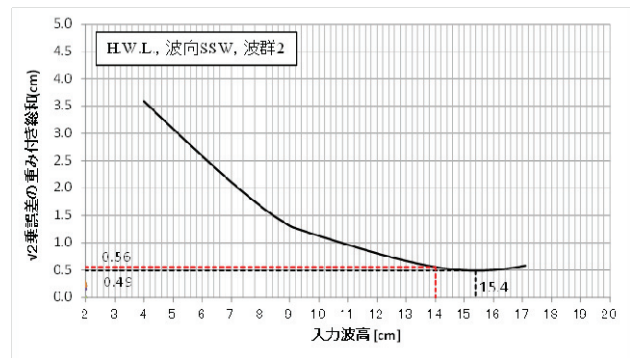
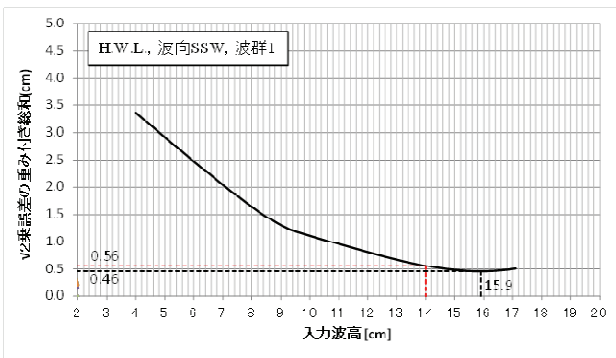
(a) 波向W



(b) 波向WSW



(c) 波向SW



(d) 波向SSW

図-B.2 入力波高に対する目標波高の再現誤差の変化（潮位H.W.L.）

港湾空港技術研究所資料 No.1286

2014.6

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(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) 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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています