

# 斜め入射条件に対する消波型高基混成式護岸の波力および越波特性

## Wave Force and Wave Overtopping Characteristics of High Mound Composite Seawall for Oblique Wave Conditions

森昌也<sup>1</sup>・山本泰司<sup>2</sup>・木村克俊<sup>3</sup>・渡辺慎也<sup>4</sup>

Masaya MORI, Yasuji YAMAMOTO, Katsutoshi KIMURA and Shinya WATANABE

A high mound composite seawall, which has a permeable front wall with a dissipation chamber on the superstructure, was newly developed as a revetment for reclaimed land. Several studies have focused on the hydraulic characteristics of high mound seawall; however sufficient examination has not been carried out on the oblique wave conditions. Three-dimensional hydraulic model experiments were conducted to investigate the wave force characteristics and wave overtopping characteristics under oblique wave conditions. Based on the phase difference of impulsive wave force acting on superstructure, wave force reduction coefficients for oblique waves were proposed. Furthermore, influence of incident wave angle on wave overtopping rate and wave run-up height were studied.

### 1. はじめに

消波型高基混成式護岸は図-1に示すような高い基礎マウンドとスリット形式の直立部を有する新形式の防波護岸である。通常の混成堤よりも高い基礎マウンド上において砕波を促進させることによって波のエネルギーを減衰させるとともに、作用する衝撃的な波圧を円柱形式のスリット部によって緩和することができる。

本構造形式を設計する上で必要な水理特性についてはこれまで実験的な検討がいくつか行われており、その特性は概ね明らかにされている。例えば、波圧特性については下迫ら(2003)が実験的な検討から作用する波圧の位相差を考慮した設計波圧分布を提案している。越波特性については木村ら(1999)が大型断面水路を用いた水理模型実験を実施して護岸天端高さを決定するための越波流量算定法を提案している。また、森ら(2001)は基礎マウンドの安定性に着目して、被覆ブロックの安定数算定法を提案している。

本構造形式は北海道森港新川地区の防波護岸として全国で初めて採用されている(山本ら, 2004)。森港においては海藻類の繁茂状況に関する現地調査が実施されており、水深が浅く光環境が良好な前面マウンドおよび遊水室内において良好な海藻群落が形成されている(松谷ら, 2006)。また、現地施工にあたっては、波圧観測用の堤体を1函設置して波圧観測を行うとともに、簡易な

手法を用いた越波観測を実施して、提案している算定法との比較を行っている(森ら, 2006;2007)。しかしながら、現地観測を含めたこれまでの検討は直角入射条件を対象としたものであり、波の入射角度が水理特性に与える影響については明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究では平面水槽を用いた水理模型実験を実施して、消波型高基混成式護岸の斜め入射条件に対する波圧低減率の算定法を提案する。さらに、護岸としての防波性能の指標となる越波流量および越波飛沫の打ち上げ高さについても入射角度の影響を明らかにするものである。

### 2. 実験の方法

#### (1) 波圧の測定方法

波圧測定実験は図-2に示すような平面水槽(長さ33.0 m, 幅20.0 m, 深さ3.0 m)において実施した。実験には現地の1/25程度の縮尺を想定した図-3に示すような消波型高基混成式護岸の断面を用いている。実験水深 $h$ は38.0 cm, 基礎マウンドの勾配は1:3, マウンド水深 $h'$ は1

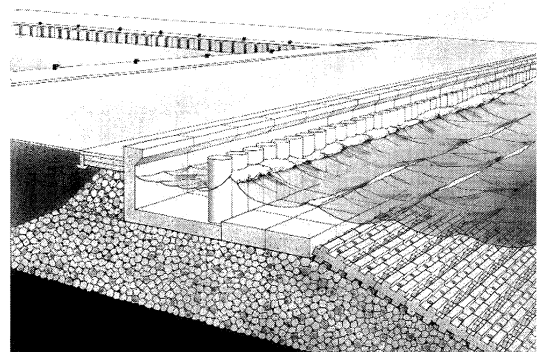


図-1 消波形高基混成式護岸

- |         |                                      |
|---------|--------------------------------------|
| 1 正 会 員 | (独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒地沿岸域チーム           |
| 2 正 会 員 | 博(工)(独法)土木研究所 寒地土木研究所 寒地沿岸域チーム 上席研究員 |
| 3 正 会 員 | 博(工)室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科           |
| 4 学生会員  | 室蘭工業大学大学院 公共システム工学専攻                 |

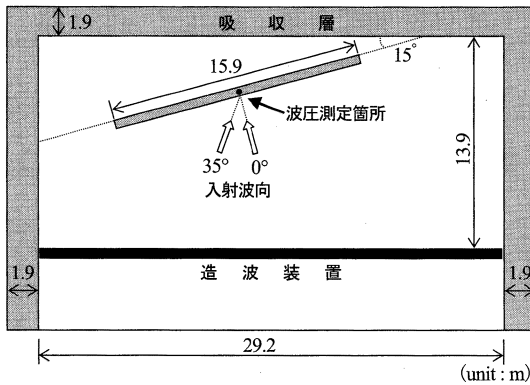


図-2 波圧測定に用いた平面水槽

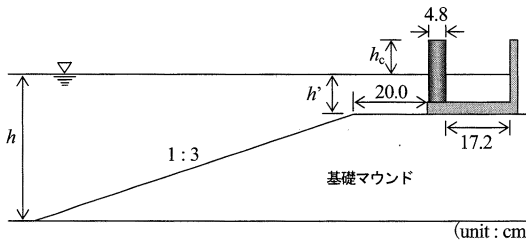


図-3 実験に用いた模型断面

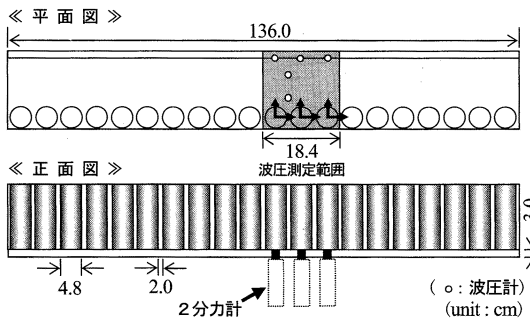


図-4 堤体本体部の模型

0.0cm, マウンド肩幅 $B_m$ は20.0cm, 堤体の本体部の開口率は29%の条件で実施した。堤体は全長15.9mの島堤とし、長さが1.36mの図-4に示すような本体部の堤体模型を基礎マウンド上に10個設置している。ここではサーペント型造波装置により波向きを設定しており、入射角度 $\beta$ は $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ の条件とした。実験に用いた波浪は修正ブレットシュナイダー光易型の周波数スペクトルを目標とする一方向不規則波とし、波数は150波とした。有義波高 $H_{1/3}$ は6.0~14.0cmの間で5種類、有義波周期 $T_{1/3}$ は1.8s, 2.2sの2種類を用いた。

波圧測定は図-2に示すような島堤の中心位置において実施した。スリット3本分の範囲を測定の対象としており、図-4に示すように2分力計(定格50N)3台を用いてスリット部に働く波圧を測定するとともに、後壁部および床版部については波圧計(定格20KPa)を用いて波圧

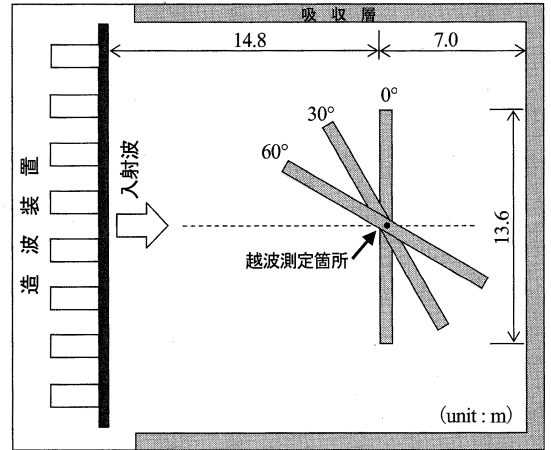


図-5 越波測定に用いた平面水槽

を測定した。ここで、データ収集時のサンプリング周波数は500Hzとしている。

## (2) 越波の測定方法

越波実験は図-5に示す平面水槽(長さ30.0m, 幅23.0m, 深さ1.0m)において越波流量および打ち上げ高さの測定を実施した。実験水深 $h$ は40.8cm, マウンド水深 $h'$ は9.6cm, マウンド肩幅 $B_m$ は20.0cm, 堤体の直立部の開口率は29%とし、護岸天端高さ $h_c$ は4.3, 7.3cmの2種類に変化させている。

波の入射角度は堤体の向きを変化させることにより設定しており、ここでは堤体の中心部分を軸として $\beta=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ の3種類に変化させて実施した。実験に用いた波浪は修正ブレットシュナイダー光易型の周波数スペクトルを目標とする不規則波とし、有義波高 $H_{1/3}$ は3.4~12.0cmの間で4種類、有義波周期 $T_{1/3}$ は1.41s, 1.96sの2種類を用いた。

図-5に示すように島堤の中心部において本体部の後壁に設置した導水樋により越波水を取水して、単位時間、単位幅当りの越波流量 $q$ ( $m^3/s/m$ )を求めた。また、越波状況をデジタルビデオカメラを用いて堤体側面から撮影し、静水面からの打ち上げ高さを一波ごとに読み取った。読み取りはスリット部および後壁部の2つの位相において行っており、打ち上げ高さの高い方の値を取りまとめに用いた。打ち上げ高さは波の実質部に相当する水塊部の高さとし、水塊部から分離した飛沫部の高さに分けられるが、ここでは飛沫部を測定の対象とし、打ち上げ高さの上位1/3の平均値 $R_{1/3}$ を用いて実験結果を整理した。

## 3. 斜め入射波に対する波圧特性

### (1) 各位相における作用波圧

消波型高基混成式護岸はスリット構造であるため、スリット部に作用する波圧が最大となる位相(Phase-I)お

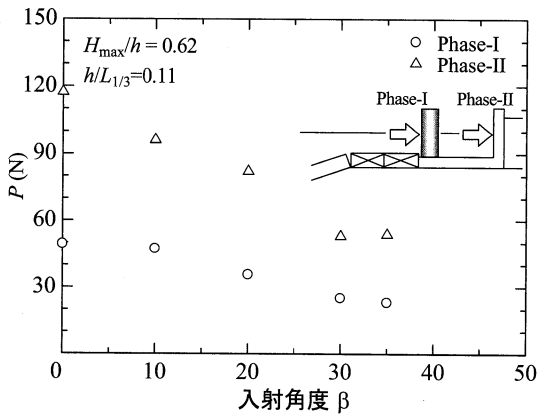


図-6 スリット部と後壁部に作用する波圧合力

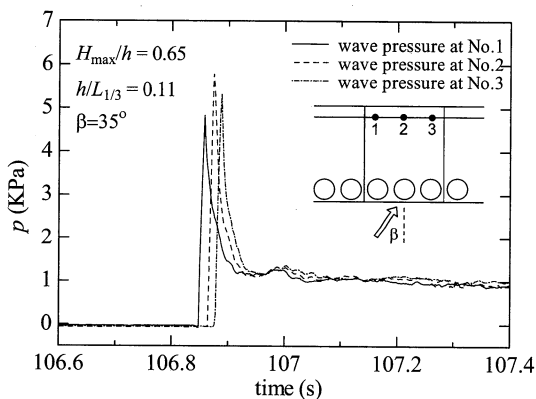


図-7 後壁部における時系列波圧波形

よび後壁部に作用する波圧が最大となる位相 (Phase-II) について作用波圧を検討する必要がある。図-6は $H_{\max}/h=0.62$ ,  $h/L_{1/3}=0.11$ の条件について、スリット部および後壁部の堤体1ブロックに作用する波圧合力 $P(N)$ と入射角度 $\beta$ の関係を示している。スリット部 (○) および後壁部 (△) とともに入射角度が増すにつれて作用する波圧合力は低減する傾向にある。入射角度が増すにつれてスリット部と後壁部の波圧合力の差が小さくなる傾向を示しているのは、見かけ上の開口率が低減していくことで、スリット部において入射波を受け止める割合が増すためと考えられる。今回実施した実験条件においては後壁部における波圧合力の方が大きな値を示していることから、以下においては、後壁部 (Phase-II) の位相に着目して斜め入射波に対する波圧低減率算定法の提案を行った。

## (2) 波圧低減係数の算定法

図-7は $H_{\max}/h=0.65$ ,  $h/L_{1/3}=0.11$ , 入射角度 $\beta=35^\circ$ の条件について、後壁部の3箇所の測点に作用する波圧波形の一例を示したものである。高マウンド構造特有の衝撃的な波圧波形を示しているが、各測点の波圧のピーク値には位相差が生じており、衝撃的な波圧が堤体に沿って移動していることが分かる。従来は斜め入射条件にお

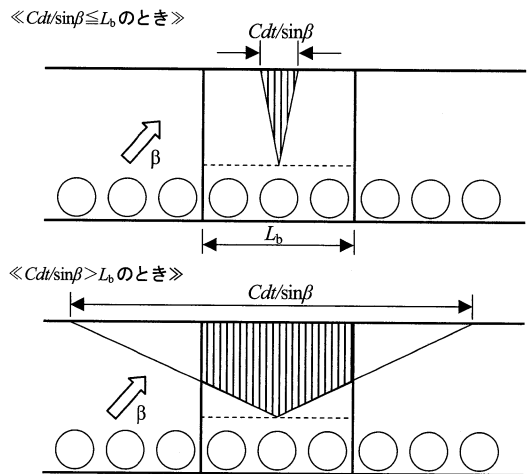


図-8 波圧の空間分布のモデル化

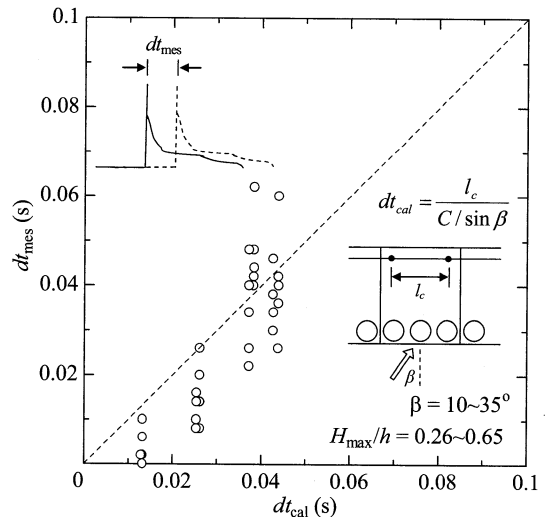


図-9 位相差の実測値と提案値の比較

いても波圧の空間分布が法線方向に変化しないとして堤体1ブロックに作用する波圧合力を求めていたが、衝撃的な波圧が作用する場合には、堤体法線方向の一部にしか波圧が作用しないことから、従来の計算法より波圧合力を低減させることができると考えられる。

上久保ら (2000) は衝撃的な波圧が作用する急勾配条件下の防波堤に着目して堤体1ブロックに作用する波圧の空間分布を考慮した波圧低減率の算定法を提案している。ここでも同様の手法を用いた波圧低減率の算定を試みた。衝撃的な波圧波形を作用時間が $dt$ で波速が $C$ の三角形波でモデル化すると、堤体1ブロックに作用する波圧の法線方向の空間分布は図-8のように示すことができる。堤体1ブロックの延長を $L_b$ とすると、図-8における縦線域の面積が1ブロックに作用する波圧合力となる。ここでは、空間分布の幅 ( $Cdt/\sin\beta$ ) が堤体1ブロック

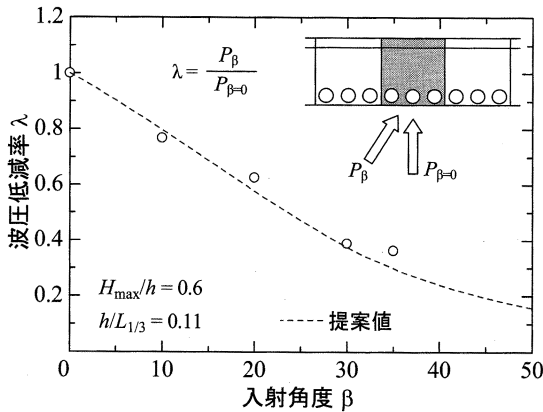


図-10 後壁部における波圧低減率

の延長 $L_b$ よりも大きい場合 ( $Cdt/\sin\beta > L_b$ ) および小さい場合 ( $Cdt/\sin\beta \leq L_b$ ) により場合分けを行っている。従来用いられてきた堤体法線に等分布で波圧が作用するとした場合と図-8の縦線域で示したような空間分布で作用するとした場合の波圧合力の比から波圧低減率は式(1)のように求めることができる。

$$\lambda = \begin{cases} 1 - L_b \sin\beta / (2Cdt) & : Cdt/\sin\beta > L_b \\ Cdt / (2L_b \sin\beta) & : Cdt/\sin\beta \leq L_b \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中の波速 $C$ の計算にあたっては、微小振幅波理論により入射波周期 $T_{1/3}$ とマウンド水深 $h'$ を用いて算定を試みた。波速算定法の妥当性を確認するため、図-9に示すように堤体法線方向の波速 $C/\sin\beta$ および波圧計間隔 $l_c$ により求めた位相差の計算値 $dt_{cal}$ と模型実験の波圧波形から求めた位相差の実測値 $dt_{mes}$ の関係で実験結果を整理した。両者は概ね一致する傾向にあり、式(1)中の $C$ の算定が可能となった。

図-10は $H_{max}/h=0.60$ の条件における後壁部の波圧低減率 $\lambda$ と入射角度 $\beta$ の関係を示している。ここで、波圧低減率 $\lambda$ は $\beta=0^\circ$ の条件で堤体1ブロックに作用する波圧

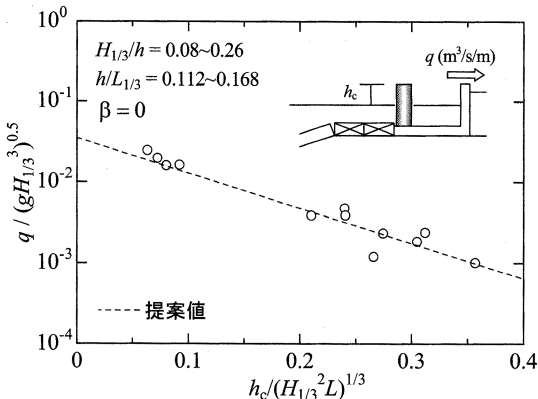


図-11 無次元天端高さと無次元越波流量の関係

合力に対する各入射角度の波圧合力の比から求めている。破線は提案している波圧低減率の計算値であるが実験結果と概ね一致する傾向にあり、提案している波圧低減率の妥当性が確認された。

#### 4. 斜め入射波に対する越波特性

##### (1) 入射角度と越波流量の関係

消波型高基混成式護岸の越波流量特性については木村ら(1999)が現地の1/4程度の縮尺を想定した大規模模型実験を実施した後壁部の波返し工による流量の低減効果を示すとともに、護岸天端高さを決定するために必要な越波流量算定式を式(2)のように提案している。また、現地森港においては、取水容器を用いた簡易な越波流量観測を実施して提案している算定法の妥当性を確認している。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = Q_0 \exp \left[ -b \frac{h_c}{(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3}} \right] \quad (2)$$

ここで、 $h_c$ は直立部の護岸天端高さ、 $g$ は重力加速度、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $L_{1/3}$ は波長、 $Q_0$ 、 $b$ は無次元係数であり、波返しのある場合は $Q_0=0.11$ 、 $b=15.5$ 、波返しのない場合は $Q_0=0.40$ 、 $b=24.4$ となる。

図-11は入射角度 $\beta=0^\circ$ の条件について無次元天端高さ $h_c/(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3}$ と無次元越波流量 $q/(gH_{1/3}^3)^{0.5}$ の関係で整理したものである。無次元天端高さの増大とともに無次元越波流量は低減する傾向を示している。図中の破線は提案している越波流量算定法の値を示しているが実験結果とよく一致する傾向にある。本研究ではこの提案式を基本として換算天端高係数を用いて見かけ上の天端高さを増減させて入射角度の影響を越波流量の算定に取り込むこととした。ここで、換算天端高係数 $\gamma_\beta$ とは、同一の越波流量となるときの各入射角度の天端高さ $h_{c,\beta}$ と入射角度 $0^\circ$ の天端高さ $h_{c,\beta=0}$ の比 $h_{c,\beta}/h_{c,\beta=0}$ である。

図-12は換算天端高係数 $\gamma_\beta$ と入射角度 $\beta$ の関係で実験

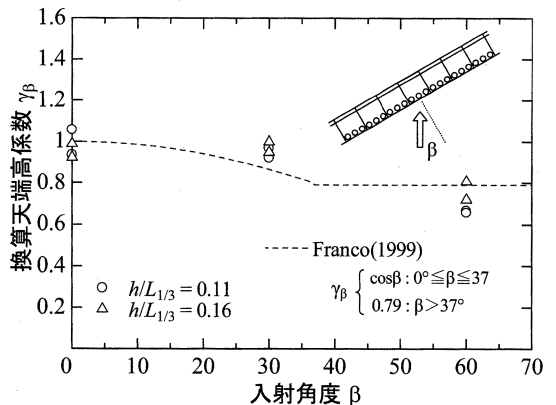


図-12 換算天端高係数と入射角度の関係

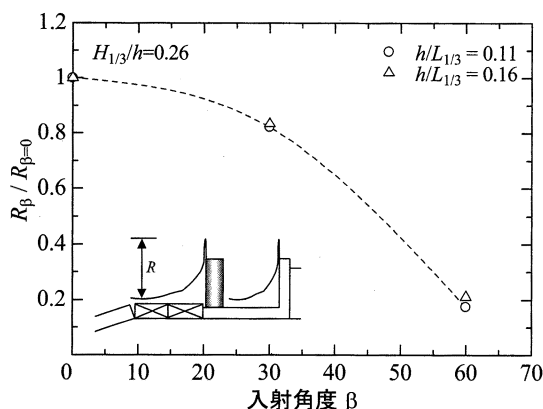


図-13 打ち上げ高さと入射角度の関係

結果を整理したものである。ここで、換算天端高係数  $\gamma$   $\beta$  は実験断面の天端高さ  $h_{c,\beta}$  と式(2)を用いて越波流量の実験値から計算した天端高さ  $h_{c,\beta=0}$  の比から求めている。入射角度  $\beta = 30^\circ$  の条件においては大きな変化は見られないが、 $\beta = 60^\circ$  の条件では遊水室内において沿い波が生じ始めるため換算天端高係数は0.8程度に低減している。図中の破線はFrancoら(1999)が直立護岸を対象とした模型実験から提案している換算天端高係数の提案値であるが、本実験の結果と概ね同様の傾向を示している。

## (2) 入射角度と打ち上げ高さの関係

図-13は  $H_{1/3}/h = 0.26$  の条件について入射角度  $\beta = 0^\circ$  の打ち上げ高さ  $R_{\beta=0}$  に対する各入射角度の打ち上げ高さ  $R_\beta$  の比  $R_\beta/R_{\beta=0}$  と入射角度  $\beta$  の関係を示している。入射角度の増大とともに  $R_\beta/R_{\beta=0}$  は低減する傾向にあり、 $\beta = 30^\circ$  の条件では0.8程度、 $\beta = 60^\circ$  の条件では0.2程度と急激に打ち上げ高さが低減することが確認された。越波飛沫は波面のスリット部および後壁部への衝突によって生じることから、作用波圧の低減とともに打ち上がる高さも低くなるものと考えられる。直角入射条件に対しては木村ら(1999)が越波飛沫および越波水塊の打ち上げ高さ算定法を提案している。図中の近似曲線で示した入射角度  $\beta$  と  $R_\beta/R_{\beta=0}$  の関係を用いることで、入射角度の影響を考慮した打ち上げ高さの算定が可能となる。

## 5. まとめ

本報告の主要な結論をまとめると以下のようになる。

- ①入射角度の増大とともにスリット部および後壁部の堤体1ブロックに作用する波圧合力は低減することを確認した。
- ②衝撃的な波圧波形を三角形波でモデル化して堤体法線方向の波圧の空間分布を考慮した波圧低減率算定法を提案した。
- ③越波流量特性について換算天端高係数と入射角度の関係を明らかにし、その値がFrancoらの提案している算定法と一致する傾向にあることを確認した。また、越波飛沫の打ち上げ高さは入射角度の増大とともに低くなる傾向にあることを確認した。

## 参考文献

- 上久保勝美・木村克俊・平沢充成・平野誠治・遠藤強(2000): 急勾配斜面上の混成堤直立部に作用する衝撃波力算定法, 第47回海講論文集, pp.941-945.
- 木村克俊・早川哲也・高橋重雄・下迫健一郎・H.Oumeraci(1999): 消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験, 第46回海講論文集, pp.756-760.
- 下迫健一郎・高橋重雄(2003): 直立部に消波構造を用いた新しい高基混成堤の開発, 港研報告, 第42巻, 第2号, p.285-305.
- 松谷明典・浅見能章・千葉不二夫(2006): 高基混成堤における環境調和機能について(第3報), 平成17年度北海道開発局技術研究発表会, (オンライン), <http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/index.htm>, 参照2007-5-17.
- 森昌也・梅沢信敏・早川哲也・木村克俊・菊池博明・遠藤強(2001): 消波型高基混成堤のマウンド被覆材の耐波安定性, 第48回海講論文集, pp.906-910.
- 森昌也・山本泰司・山口圭太・木村克俊・田端恵士・須藤賢哉(2006): 北海道森港における消波型高基混成堤の波力特性に関する現地観測, 第53回海講論文集, pp.756-760.
- 森昌也・山本泰司・木村克俊・浅見能章(2007): 消波型高基混成式護岸の現地越波観測とその対策について, 第54回海講論文集, pp.731-735.
- 山本泰司・木村克俊・田端恵士・北原繁志・二ノ宮清志・佐藤典之(2004): 北海道森港における消波型高基混成堤の設計と施工, 海講論文集, 第51巻, pp.781-785.
- Franco, C. and Franco, L.(1999): Overtopping Formulas for Caisson Breakwaters with Nonbreaking 3D Waves, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.125, No2