

# 直立消波ケーソン式護岸における越波飛沫の打ち上げ特性と その対策に関する検討

木村 克俊\* ・ 浜口 正志\*\* ・ 山本 泰司\*\*\*  
前田 宗文\*\*\*\* ・ 三船 修司\*\*\*\*\*

沖合人工島の護岸として建設中の直立消波ケーソン堤を対象にして越波飛沫の打ち上げ特性を調べた。現地観測を行って合計 6 ケースの越波飛沫の打ち上げデータを得た。水理模型実験によりこの現象を再現することによって、遊水室後壁に波面がやや衝撃的に作用する際に飛沫が生じ易いことを示した。さらに波浪条件を変化させた系統的な実験を行って、越波飛沫の打ち上げ高さの算定式を求めた。対策工として、遊水室後壁の上部に波返工を設置した場合の検討を行い、越波飛沫および越波流量の低減効果を確認するとともに、作用波力特性を明らかにした。

## 1. はじめに

直立消波ケーソンは比較的水深の大きな条件に適した消波構造であり、これまでにスリット部や遊水室の形状が異なる各種の構造形式が考案されてきた。また、標準的な設計法もほぼ確立した段階にあり(高橋, 1997)、現地における施工実績も年々増加している。

現行の設計基準では、通常の護岸の場合、設計波浪条件(30 年または 50 年確率波)に対して、越波流量を  $10^{-2}$   $\text{m}^3/\text{m/s}$  のオーダーに抑えることが定められている。一方、護岸背後に道路や親水性施設が配置される場合や、漁港のように護岸近くで人的作業が行われる場合には、さらに越波流量の許容値を小さくする必要がある。

直立消波ケーソン式護岸の越波流量に関しては、高山ら(1982)が系統的な水理模型実験を行い、必要天端高さの算定法を提案している。しかしながら、この方法は越波流量が  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  ( $\text{m}^3/\text{m/s}$ ) のオーダーを対象としたものであり、これより越波流量の少ない条件への適用性は確認されていない。こうした場合には越波飛沫が利用障害をもたらす危険があるため(木村ら, 1998)、その空間的な飛散特性を明らかにする必要がある。

外海に面した直立消波ケーソン式護岸では、部材波力が大きくなるため上床板を設置しない場合が多いが、こうした構造では越波飛沫が発生しやすい。本研究では、現在施工中の直立消波ケーソン式護岸を対象として、現地観測と水理模型実験を行い、越波飛沫の打ち上げ特性を明らかにする。さらに、具体的な対策のひとつである波返工に着目し、その効果と作用波力について検討する。

## 2. 現地の状況

### (1) 沖合人工島の概要

北海道室蘭市の追直漁港では、栽培漁業の洋上支援基

地として図-1 に示す沖合人工島が整備中である。その外周護岸として図-2 に示す縦スリット型の直立消波ケーソン式護岸の建設が進められている。護岸の背後には人工島へのアクセス橋梁が設置される予定であり、通行車両に対する越波飛沫の影響を考慮した適切な道路管理が求められている。また護岸の直背後は水産物の干場や漁具保管場として利用されるため、越波飛沫の発生状況の把握が必要となった。

### (2) 現地観測

越波飛沫の現状を把握するため、2001 年 9 月から 2002 年 1 月まで現地観測を行った。観測期間中、人工島沖の水深 30 m 地点に波高計を設置して沖波の諸元を求めた。直立消波ケーソン護岸のパラペット上の 3 箇所に高さ 4 m の観測用ポールを設置し目印とした。現港地区の護岸上にデジタルビデオカメラを固定し、パラペットよ

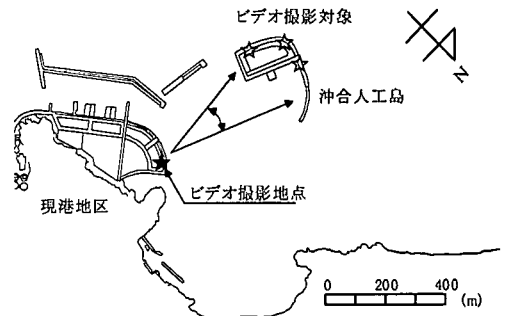


図-1 沖合人工島の平面配置

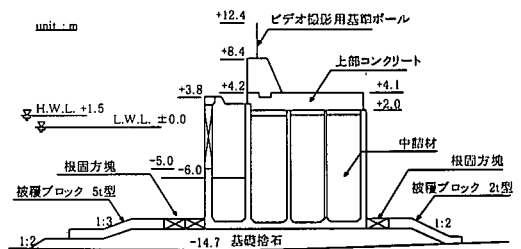


図-2 直立消波ケーソン式護岸の断面形状

\* 正 会 員 博(工) 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工  
学科  
\*\* 学生会員 室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻  
\*\*\* 正 会 員 工 修 (独法)北海道開発土木研究所 港湾研究室  
\*\*\*\* 北海道開発局室蘭港湾建設事務所  
\*\*\*\*\* 正 会 員 理 修 日本データサービス(株)総合解析室

り上方に打ち上げられた越波飛沫の状況を撮影した。

現地では合計6データが観測された。越波飛沫の最大打ち上げ高さ  $R_{\max}$  と波浪諸元を表-1に、 $R_{\max}$  の発生位置を図-3に示す。2001年12月15日はW方向から  $T_{1/3}=5$  s程度の短周期波浪が来襲し、人工島側面の護岸で越波飛沫が観測された。2002年1月21, 22日には、S方向から  $T_{1/3}=9\sim 12$  s程度の波浪が来襲し、人工島の正面において越波飛沫が観測された。いずれも波向きに直角となる位置で越波飛沫が発生しており、斜め入射条件では越波飛沫は生じていない。

### 3. 越波飛沫の打ち上げ特性

#### (1) 実験の方法

水理模型実験は2次元造波水路(長さ22 m, 幅0.8 m, 高さ2.0 m)で行った。実験模型(図-4)は現地の直立消波ケーソン式護岸を縮尺1/25で再現した。なお、比較のために天端高さの等しい消波ブロック被覆堤についても実験を行った。波返工は遊水室後壁の上端に取り付けた。断面形状は直角二等辺三角形とし、等辺長  $b$  を3種類に変化させてその効果を調べた。

潮位条件は現地のH.W.L.とし、実験水深  $h$  は63 cmで一定とした。実験はすべて不規則波で行い、1波群150波を標準とした。実験波の周期  $T_{1/3}$  は1.00~2.80 s, 波高  $H_{1/3}$  は4~24 cmに変化させた。

越波飛沫の打ち上げ状況は、水槽のガラス面および模型正面の2箇所からデジタルビデオカメラで撮影した。この画像を用いて1波ごとに静水面からの打ち上げ高さ  $R$  を読み取り、その代表値  $R_{\max}$ ,  $R_{1/10}$  および  $R_{1/3}$  を求めた。なお波返工の効果に関する実験では、越波飛沫の観測とともに、樋を用いて越波水を堤体背後に導き、越波流量も測定した。

#### (2) 打ち上げパターン

写真-1は、現地観測結果のケースDの越波状況である。遊水室後壁に波面が衝突し、空気を含んだ飛沫が上方に打ち上げられている。図-5は、写真-1撮影時に相当する波浪条件( $T_{1/3}=2.00$  s,  $H_{1/3}=16.0$  cm)を実験で再現したものである。①において波面はスリット壁に作用するがここでは飛沫は発生していない。②で遊水室後壁に波面が衝突し、③で飛沫が打ち上げられている。実験では現地に比べて気泡の混入が少なく、水脈から分離した水滴が上方に打ち上げられる。現地における飛沫を再現するため、数回の試行を行って実験で読み取る水滴径を決定した。

周期の短い波が作用した場合には、①のタイミングにおいてもスリット前面で飛沫が発生する。その打ち上げ高さを  $R_1$ 、前述した遊水室後壁での打ち上げ高さを  $R_2$  とする。すべての波浪条件に対して両者を比較した結果、

表-1 現地観測結果

|   | 年月日        | 時刻          | $h$ (m) | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (s) | 波向 | $R_{\max}$ (m) |
|---|------------|-------------|---------|---------------|---------------|----|----------------|
| A | 2001.12.15 | 9:50~10:10  | 15.6    | 2.1           | 4.9           | W  | 6.6            |
| B | 2001.12.15 | 11:50~12:10 | 15.6    | 1.8           | 5.3           | W  | 6.4            |
| C | 2001.12.15 | 13:50~14:10 | 16.0    | 1.9           | 5.6           | W  | 7.1            |
| D | 2002.1.21  | 15:50~16:10 | 15.4    | 3.5           | 9.4           | S  | 11.0           |
| E | 2002.1.22  | 11:50~12:10 | 15.3    | 3.4           | 11.9          | S  | 16.0           |
| F | 2002.1.22  | 13:50~14:10 | 15.4    | 3.3           | 11.7          | S  | 16.0           |

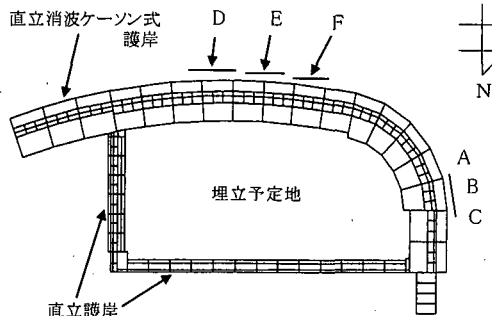


図-3 最大打ち上げ高さ  $R_{\max}$  の発生位置

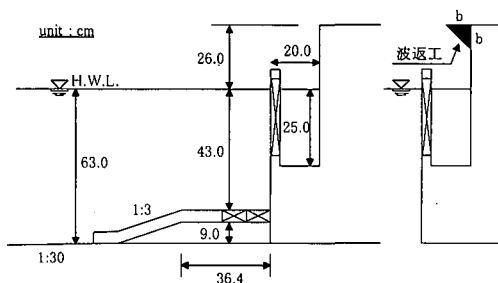


図-4 実験模型の断面形状

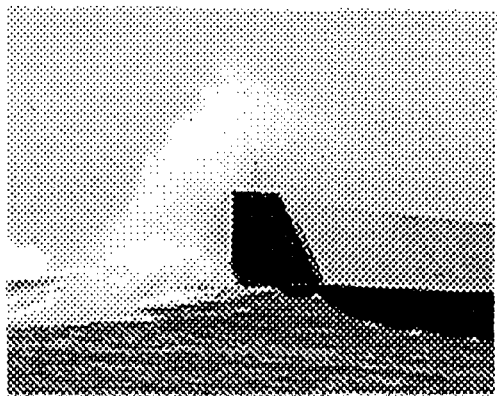


写真-1 現地における越波飛沫の打ち上げ状況

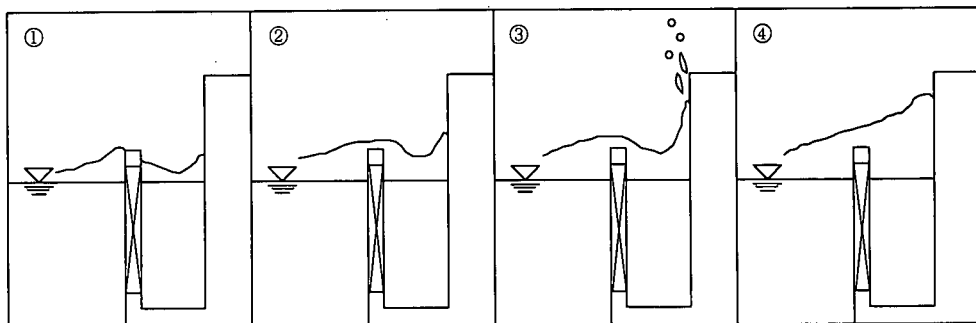


図-5 越波飛沫の打ち上げパターン

図-6 に示すように  $R_{II}$  が卓越することが明らかになった。以下、 $R_{II}$  の値について検討する。

### (3) 波高と打ち上げ高さの関係

図-7 は  $T_{1/3}=2.00$  s の条件についての波高  $H_{1/3}$  と越波飛沫の打ち上げ高さ  $R_{1/3}$  の関係を示している。直立消波ケーソンでは  $H_{1/3}=8$  cm 以上になると越波飛沫の打ち上げが顕著となる。また、消波ブロック被覆堤と比較すると、直立消波ケーソンのほうが越波飛沫の打ち上げ高さが大きいことがわかる。

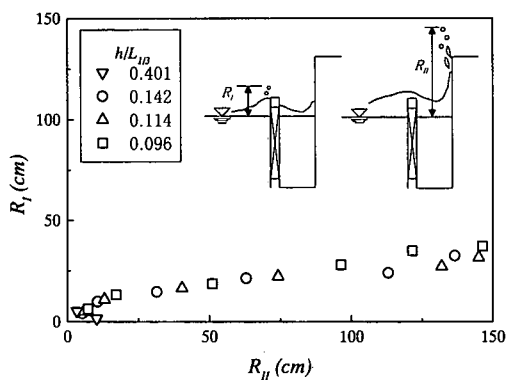
図-6  $R_I$  と  $R_{II}$  の比較

図-8 は、相対水深  $h/L_{1/3}$  をパラメーターとして、無次元打ち上げ高さ  $R_{1/3}/H_{1/3}$  と波高水深比  $H_{1/3}/h$  の関係を示している。 $R_{1/3}/H_{1/3}$  の値が  $H_{1/3}/h$  が 0.18 付近から増大するのは、遊水室後壁にやや衝撃的に波面が衝突するためである。さらに波高が大きくなると越流が顕著となり、越波飛沫の打ち上げ高さは頭打ちとなる。全体的に周期の影響が小さいことから、平均的な傾向に着目して  $R_{1/3}/H_{1/3}$  と  $H_{1/3}/h$  の関係を以下のように定式化した。

$$R_{1/3}/H_{1/3} = \begin{cases} 1.5 & (H_{1/3}/h < 0.18) \\ 30(H_{1/3}/h) - 3.9 & (0.18 \leq H_{1/3}/h \leq 0.33) \\ 6.0 & (0.33 < H_{1/3}/h) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-9 は越波飛沫の打ち上げ高さの代表値間の関係を示している。前述した衝撃波力の影響が現れ、図中の実線で示すように  $R_{\max}/R_{1/3}$  および  $R_{1/10}/R_{1/3}$  の値が、 $H_{1/3}/h=0.18$  付近でピークをもつ傾向がある。

以上の実験結果を用いて、現地観測された波浪条件に対する  $R_{\max}$  を計算した。その結果、図-10 に示すように計算値はおおむね現地観測値と一致することが確かめられた。

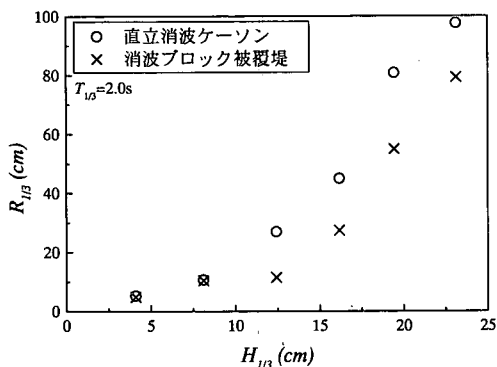


図-7 波高と越波飛沫の打ち上げ高さ

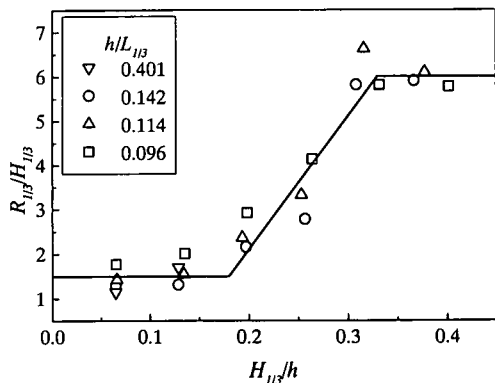


図-8 無次元打ち上げ高さ

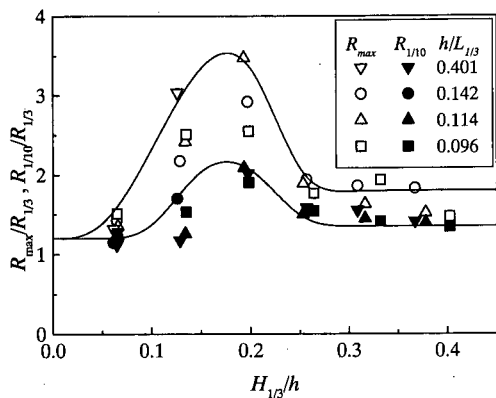


図-9 打ち上げ高さの代表値

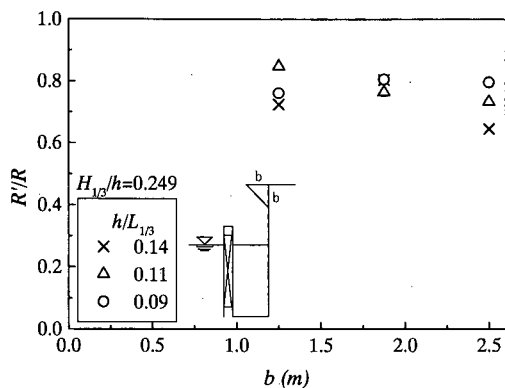


図-11 波返工による飛沫低減効果

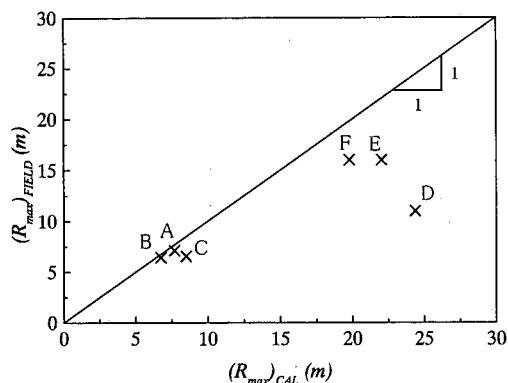


図-10 計算値と現地観測値の比較

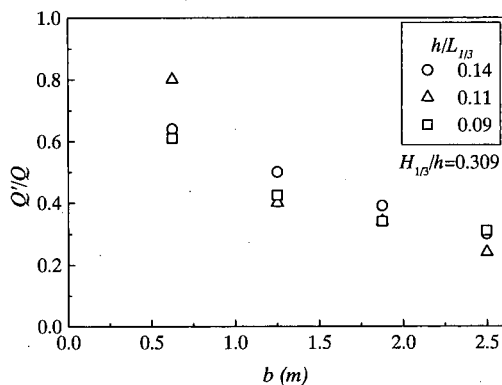


図-12 波返工による越波流量の低減効果

#### (4) 波返工の効果

図-11は、現地における利用限界条件 ( $H_{1/3}=4\text{ m}$ ) に対して、波返工幅  $b$  と越波飛沫の打ち上げ高さの低減率  $R'/R$  の関係を示している。いずれの周期条件に対しても、波返工を設置することで打ち上げ高さを20%程度低減できる。

図-12は、設計波条件 ( $H_{1/3}=6\text{ m}$ ) を対象とした越波流量の低減効果  $Q'/Q$  を示している。いずれの周期条件に対しても、波返工幅  $b$  が大きいほど越波流量の低減効果が顕著となる。この場合は水脈が厚いため、波返工幅が大きいほど流れの方向を変えるのに効果がある。

#### 4. 波返工に働く波力

##### (1) 実験の方法

波力実験は小型2次元造波水路(長さ24 m, 幅0.6 m, 高さ1.0 m)において実施した。模型縮尺を1/50とし、図-13に示すように波返工を2分力計に取り付け、鉛直および水平波力を求めた。なお、波返工の断面形状は三角形と矩形の2種類とし、幅  $b$  は5 cm で一定とした。実験波は規則波とし、 $T=1.41, 1.70$  および  $1.98\text{ s}$  の3種

類、波高  $H$  を2~14 cm に変化させた。波力データはサンプリング周波数200 Hz で収録し、波別解析を行って各波力のピーク値を求めた。

##### (2) 波力特性

図-14は三角形波返工に働く波力の鉛直成分  $F_v$  の実験結果を示している。縦軸には  $F_v/w_0HA$  (ここで  $A$  は受圧面積) をとり、横軸には波返工の設置高さ  $h_c$  を波高  $H$  で除した無次元値を示している。 $h/L$  が小さい条件ほど  $F_v$  は大きい。これは周期が長いほど後壁への水平波圧が大きくなることや、越波流量も大きくなることとその原因と考えられる。また  $h_c/H$  が1.2より小さい場合に  $F_v$  の値が増大する。

ここでは中田ら(1983)が上部斜面ケーソンに適用したモデルを用いて、三角形波返工に働く波力を検討する。矩形波返工への作用波力  $F_0$  とすると、三角形波返工(傾斜角  $\theta$ ) に働く波力の鉛直成分  $F_v$  および水平成分  $F_H$  は以下のように表される。

$$F_v = F_0 \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_H = F_0 \sin \theta \cos \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

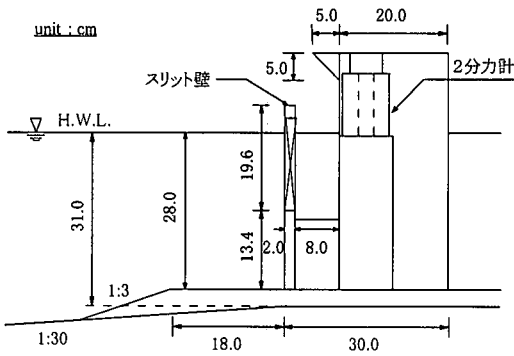


図-13 波力実験用模型

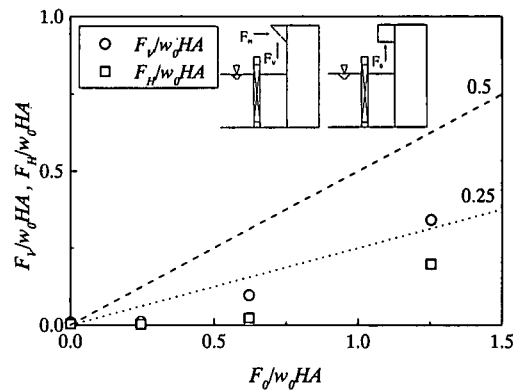


図-15 波返工の形状効果

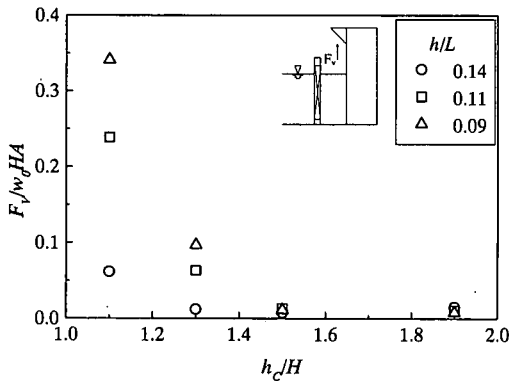


図-14 波返工に働く波力

図-15 は  $F_0$  と  $F_H$  および  $F_v$  の関係を示している。式(2)および(3)に  $\theta=45^\circ$  を代入すると係数はともに 0.5 となるが、実験値はこれより小さく 0.25 程度となった。

## 5. ま と め

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- ①直立消波ケーソン式護岸を対象として越波飛沫の現地観測を行い、その特性を明らかにした。
- ②水理模型実験により現地の越波飛沫の状況を再現するとともに、打ち上げ高さの算定式を求めた。

③波返工による越波飛沫および越波流量の低減効果と、作用波力特性を明らかにした。

直立消波ケーソン式護岸では、遊水室の幅や水深などの構造条件によって越波飛沫の発生パターンが異なることも考えられる。今後さらに系統的な検討を行って一般的な算定法を確立する必要がある。

本研究の実施に際しては、元開発土木研究所港湾研究室研究員の早川哲也氏(現北海道開発局港湾空港部)ならびに鈴木孝信氏(現北海道開発局釧路開発建設部)の協力を得た。また、本論文で示した実験の一部は北日本港湾コンサルタント(株)土井善和氏によって行われたものである。ここに記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安部隆二・石本敬志 (1998): 道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 676-680.
- 高橋重雄 (1997): 新構造防波堤とその設計, 平成8年度土木学会水工学に関する夏期研修会 B-5, pp. 1-20.
- 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.
- 中田邦夫・池田竜彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田隆 (1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 313-316.