

消波型高基混成式護岸の現地越波特性とその対策について

Field Observation of Wave Overtopping for High Mound Composite Seawall

森 昌也¹・山本泰司²・木村克俊³・浅見能章⁴

Masaya MORI, Yasuji YAMAMOTO, Katsutoshi KIMURA and Yoshiaki ASAMI

A high mound composite seawall, which has a permeable front wall with a dissipation chamber on the superstructure, on a relatively high mound was newly developed as a revetment for reclaimed land or artificial island. Newly developed seawall was constructed in the Mori port of Hokkaido and field observation was conducted to investigate the wave-overtopping characteristics. It is shown that the wave-overtopping rate gives good agreement with empirical prediction methods derived from laboratory test by Kimura et al (1999), but wave run-up height was found to be higher than prediction methods. Furthermore, large-scale model experiments were conducted to clarify the wave-force characteristics of wave splash barrier, which were countermeasures against wave-overtopping.

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碎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おり、平成 16 年に全施工延長における本体部の据付が完了している。

消波型高基混成式護岸の部材設計に必要な波圧特性については下迫ら(2003)が各位相における波圧分布を提案するとともに、森ら(2006)が森港において現地波圧観測を実施して提案されている波圧分布との比較を行っている。また、越波特性については木村ら(1999)が、大型水路を用いた水理模型実験を実施して、護岸の天端高さを決定するための越波流量および越波飛沫の打ち上げ高さ算定法を提案している。さらに、海藻類の繁茂状況に関する現地調査から、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ことが松谷ら(2006)によって報告されている。

森港においては護岸背後域の利用上の観点から護岸天端上に防波フェンスの設置を検討している。防波フェンスの設計にあたっては風圧などとともに越波による影響についても考慮する必要があるが、その作用波圧特性は明

らかになっていない。

本研究では、現地観測結果に基づいて越波飛沫の打ち上げ高さおよび越波流量算定法の妥当性を確認する。さらに、護岸天端上の防波フェンスに関して設計に必要な作用波圧特性を明らかにするものである。

2. 現地観測の方法

北海道内浦湾の南部に位置する地方港湾である森港は平成 10 年より図-2 に示す新川地区の整備を進めており、コストの縮減や反射波の低減を目的として消波型高基混成式護岸が採用された。森港における構造緒元の決定過程および現地施工方法については山本ら(2004)が報告している。打ち上げ高さおよび越波流量に関する現地観測は森港において同構造形式が施工されている 170 m の区間を対象として実施した。

飛沫の打ち上げ高さに関する現地観測は平成 18 年 1 月 8 日～3 月 20 日および平成 18 年 12 月 29 日～平成 19 年 1 月 8 日の期間に実施した。打ち上げ高さを測定するために護岸全体を見通せる位置にビデオカメラを設置し、図-2 に示す方向から飛沫の打ち上げ状況を撮影

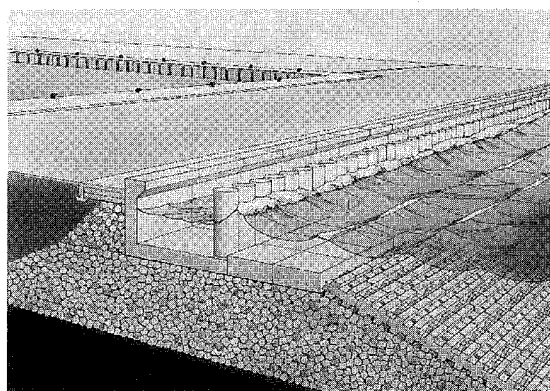


図-1 消波型高基混成式護岸

1 正会員	(独法)土木研究所	寒地土木研究所	寒冷沿岸域チーム
2 正会員	博(工)	(独法)土木研究所	寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 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	北海道開発局	函館開発建設部	函館港湾事務所

した。撮影した映像から毎正時20分間における静水面からの打ち上げ高さを1波毎に読み取り、上位1/3の平均値である $R_{1/3}$ で観測結果を整理している。打ち上げ高さは波の実質部分に相当する水塊と波面から分離した飛沫に分けられるが、撮影した映像から水塊の読み取りが困難であるため、ここでは飛沫のみを測定の対象とした。

越波流量を観測したのは平成17年1月30日、2月10日、2月23日および3月12日の4日間であり、この期間内において $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ($\text{m}^3/\text{m/s}$) のオーダーの越波流量を合計10ケース観測することができた。越波流量の観測箇所を図-2に示す。越波流量の測定には開口面積が 740 cm^2 の取水容器を用い、図-3に示すように護岸背後に2.0 m 間隔で合計10個設置して毎正時20分間における越波水を取水した。また、越波飛沫の到達しない箇所にも容器を設置して降水・降雪による影響を取り

除いている。ここでは、それぞれの容器の取水した重量を合計して一般的に用いられている単位幅当りの越波流量 $q(\text{m}^3/\text{m/s})$ を計算した。

風向風速は図-2に示す地点の護岸天端上3.0 m の位置において三杯型風速計およびベーン型風向計による観測を行った。観測期間における平均風速は $7.4 \sim 19.3 \text{ m/s}$ であり、風向は護岸に対して概ね直角方向であった。波浪は図-2に示すように護岸前面から150 m 程度離れた水深-8 m 地点において超音波式波高計によって観測した。観測期間における有義波高 $H_{1/3}$ は $0.51 \sim 2.46 \text{ m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ は $3.6 \sim 6.1 \text{ s}$ 、波向きは護岸に対してほぼ直角入射であった。観測期間における気象海象条件の詳細を表-1に示す。

3. 越波飛沫の打ち上げ高さ特性

(1) 飛沫の打ち上げ状況

消波型高基混成式護岸はスリット構造であるため、スリット部における打ち上げ高さ $R_{1/3 \text{ Phase I}}$ および後壁部における打ち上げ高さ $R_{1/3 \text{ Phase II}}$ をそれぞれ測定している。写真-1は、有義波高 $H_{1/3} = 0.93 \text{ m}$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 4.5 \text{ s}$ 、平均風速 16.2 m/s の条件におけるスリット部 (Phase I) および後壁部 (Phase II) の打ち上げ状況の一例を示している。今回の観測では平均風速 7.4 m/s 以上の強風時に観測を行っているため、スリット

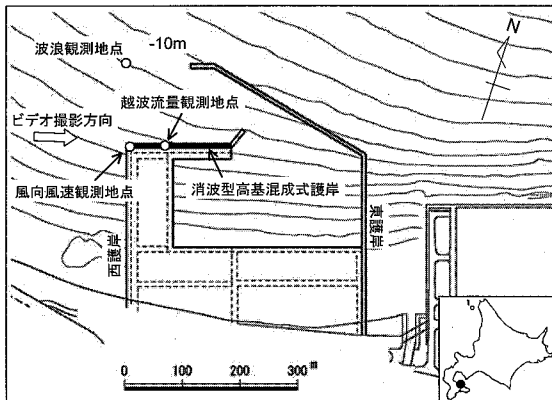


図-2 森港新川地区の施設配置

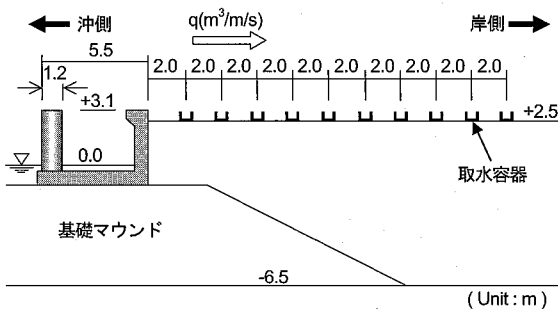


図-3 越波流量の観測方法

表-1 気象海象条件

	打ち上げ高さ	越波流量
有義波高(m)	0.67 ~ 2.46	0.50 ~ 1.15
有義波周期(s)	3.9 ~ 6.1	3.6 ~ 4.8
波 向	NNE ~ NNW	N ~ NNW
平均風速(m/s)	7.4 ~ 19.3	8.8 ~ 15.5
測定ケース数	15	10

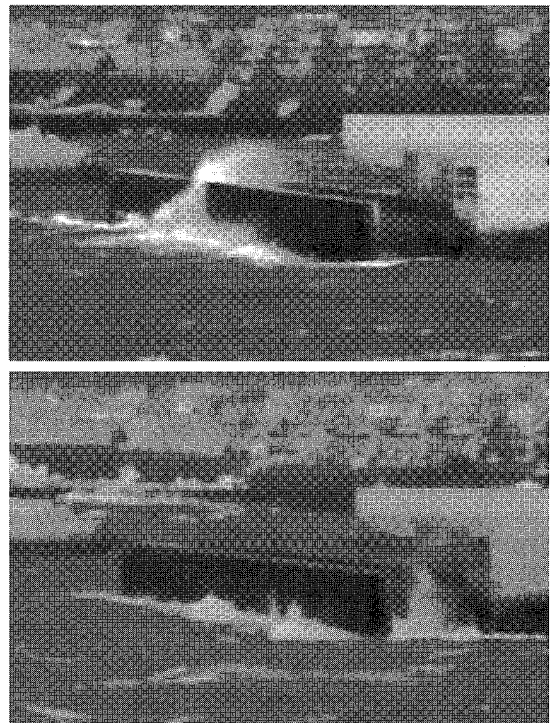


写真-1 飛沫の打ち上げ状況

部および後壁部ともに打ち上げられた飛沫が風によって巻上げられ、ミスト状になる様子が確認された。

(2) 飛沫打ち上げ高さの提案値との比較

木村ら (1999) は現地の 1/4 程度の縮尺を想定した大規模模型実験を実施して、消波型高基混成式護岸の水塊および飛沫の打ち上げ高さ算定法を提案している。まず、各位相における打ち上げ高さの違いを確認するため、スリット部および後壁部の打ち上げ高さ比 $R_{1/3 \text{ Phase I}} / R_{1/3 \text{ Phase II}}$ と波高水深比 $H_{1/3}/h$ の関係を図-4 に示した。位相毎の打ち上げ高さの差は波高水深比が 0.17 より小さい条件では現れていないが、0.17 以上の条件においては波高水深比が大きい条件ほどスリット部に比べて後壁部における打ち上げ高さの方が大きくなっている。これは、波高が増大するにつれて後壁部において入射波を受け止める割合が増加するためと考えられる。

図-5 は打ち上げ高さの提案値 $R_{1/3 \text{ cal}}$ と後壁部における現地観測値 $R_{1/3 \text{ Phase II}}$ を比較したものである。すべて

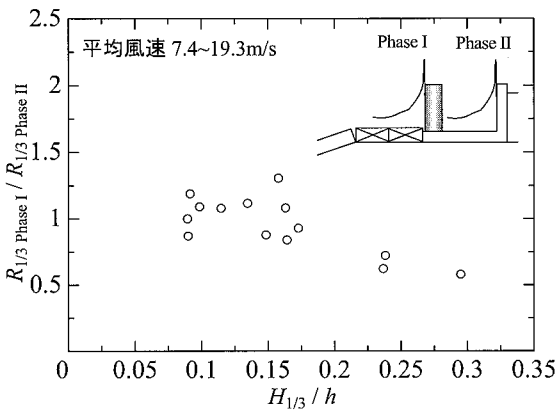


図-4 各位相における飛沫打ち上げ高さ

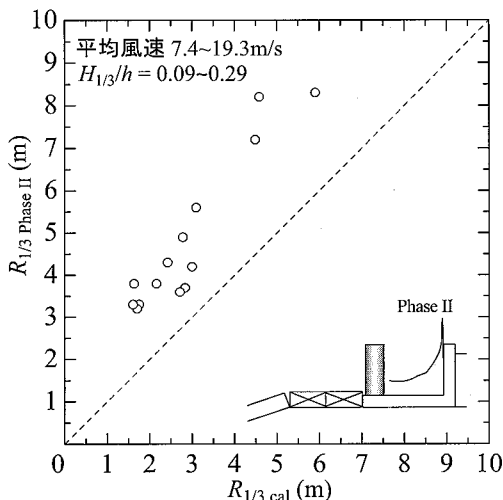


図-5 飛沫打ち上げ高さの提案値との比較

の条件において現地観測結果は提案値を上回っており、現地の 1/4 程度を想定した模型実験の結果であっても、打ち上げ高さを過小評価することが確認された。これは、実験による提案値は無風時の条件で提案しているのに対して、現地観測では平均風速が 7.4 m/s 以上と比較的強く、写真-1 で示したような風による巻上げによって提案値を上回ったものと考えられる。

4. 越波流量特性

(1) 越波流量の提案値との比較

越波流量特性については木村ら (1999) が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、護岸の天端高さを決定するために必要な越波流量算定式を式 (1) のように提案している。

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

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 および b は無次元係数であり 0.11 および 15.5 を示す。

現地観測した越波流量を提案値と比較するため、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 $q / (g H_{1/3}^3)^{0.5}$ の関係で整理したのが図-6 である。図中の破線は式 (1) で示した越波流量算定法の値であり、比較的強風時の観測であるが、現地観測結果とおおむね一致する傾向にある。越波流量観測においてはミスト状の飛沫ではなく、ある程度の大きさの水塊を対象としているため、風の影響は小さいものと考えられる。また、福田ら (1973) も本検討と同様の現地越波流量観測の結果から、風の影響によって越波流量のオーダーまでは変化しないことを報告している。

(2) 越波水の水平飛散特性

今回の現地観測では護岸背後に等間隔で設置した取水容器により越波水量を測定しているため、護岸背後にお

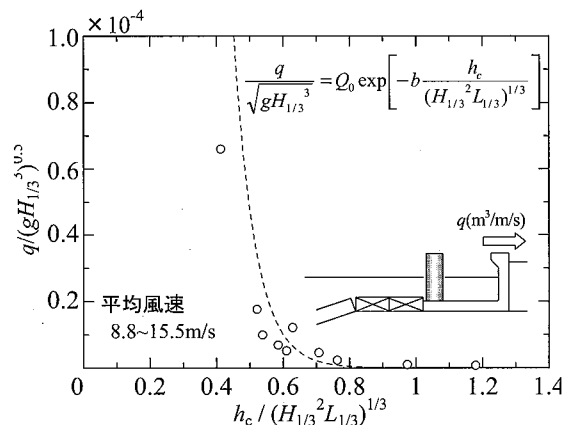


図-6 越波流量の現地観測結果

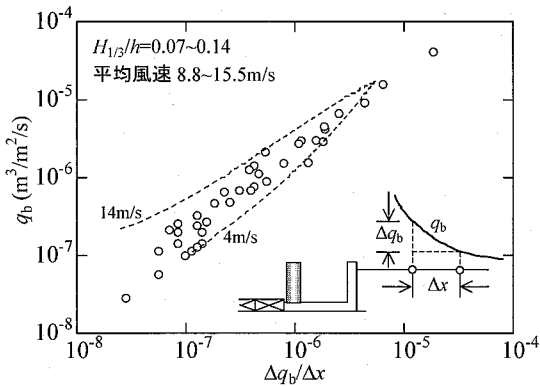


図-7 流量の水平方向勾配

ける越波水の水平方向の分布を求めることができる。護岸背後の越波水の水平分布については福田ら (1973) が現地観測から越波水の水平分布特性を示している。ここでも福田らと同様に図-7 に示すように単位面積当りの越波流量 q_b ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$) と q_b の水平方向勾配 $\Delta q_b/\Delta x$ の関係で整理した。ここで、 Δq_b は観測地点間の q_b の差、 Δx は観測地点間の距離を示す。単位面積当りの越波流量が多い地点では水平勾配が急な分布をしているのに対して、越波流量が少ない地点では水平方向勾配が緩やかになっており、風の影響で飛散距離が長くなることが確認された。図中の破線は福田らの提案している図表から読み取った値を示しているが、概ね今回の現地観測結果と一致する傾向にある。

5. 防波フェンスへの作用波圧特性

(1) 水理模型実験の方法

現地の 1/8 の縮尺を想定した水理模型実験を実施して防波フェンスへの作用波圧特性を確認した。実験には大型造波水路 (長さ 85.0 m, 幅 1.6 m, 深さ 3.0 m) を使い、1/30 の海底勾配から続く水平床上に図-8 に示すような消波型高基混成式護岸の模型を設置した。実験水深 h は 0.81 m, 0.93 m, 1.04 m の 3 種類に変化させており、直立部の円柱型スリットの開口率は 26%, 遊水室幅は 0.53 m, 後壁部の波返し工の張り出し長さは 6.3 cm として現地の断面を再現した。

実験に用いた波浪は修正プ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、波数は 200 波とした。有義波高 $H_{1/3}$ は 0.125 ~ 0.425 m の間で 5 種類、有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.77 s, 2.47 s, 3.18 s の 3 種類を用いた。

防波フェンスは図-9 に示すように高さ 25 cm, 幅 38.7 cm として直立部後壁の天端上に設置している。本実験で用いたフェンスはステンレス製で高さ方向に 3 つ

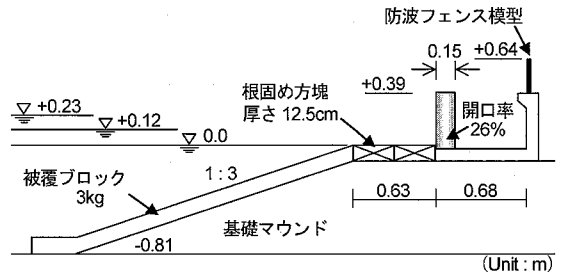


図-8 実験に用いた断面

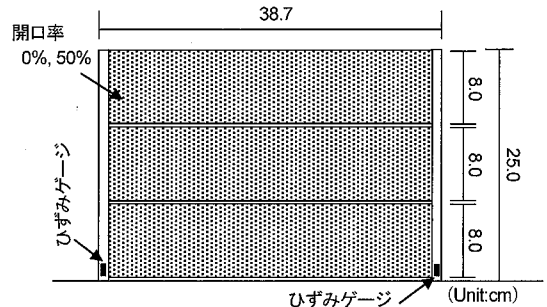


図-9 防波フェンスの模型

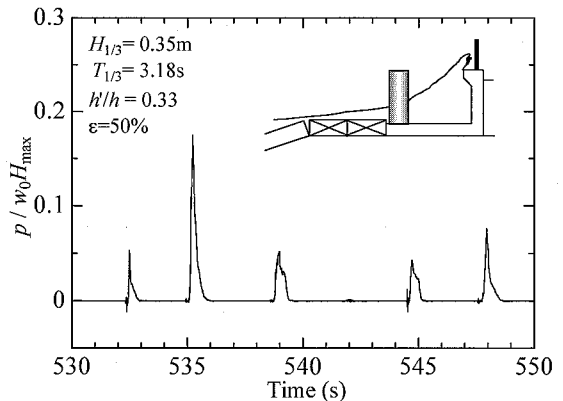


図-10 時系列の波圧波形

のブロックに分かれており、開口率 ε は 50% および 0% (不透過) の 2 種類に変化させて実施した。ここで、開口率 50% のフェンスは直径 3.0 mm の円形の穴により開口を設けている。作用力の測定にはフェンスを支える支柱の下端に取り付けたひずみゲージの値から曲げモーメントを計算し、波圧を逆算している。データ収集のサンプリング周波数は 200 Hz とし、波圧の最大値 $p_{\max}$ を用いて整理した。

(2) 作用波圧特性

図-10 は水深 $h=1.04$ m, 有義波高 $H_{1/3}=0.35$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=3.18$ s, 開口率 50% の条件における無次元波圧強度 $p/w_0 H_{\max}$ の時系列波形の一例を示してい

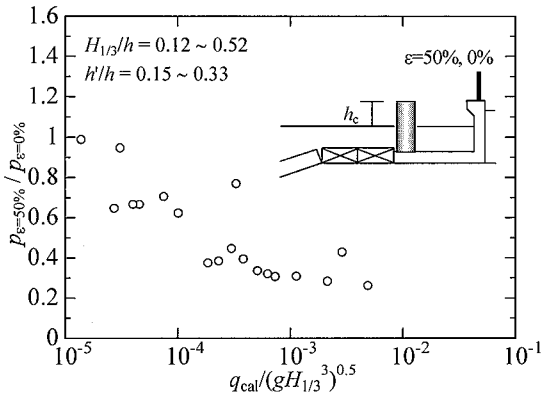


図-11 開口率の影響

る。防波フェンスへの波の作用時間は1秒程度であり、越流した水塊がフェンスに衝突したときにピークを示し、その後はなだらかな波圧波形を示している。

フェンスの開口率の影響を確認するために開口率50%および0%の条件における作用波圧の比 $p_{\varepsilon=50\%}/p_{\varepsilon=0\%}$ と無次元越波流量 $q_{cal}/(gH_{1/3}^3)^{0.5}$ の関係を図-11に示した。護岸を越波水が越流するような越波流量の多い条件では開口部から越波水が流れ出ることによる波圧の低減効果が現れているのに対して、飛沫が作用するような越波流量の少ない条件では飛沫がフェンスにトラップされるために開口率の影響が小さくなることが確認された。

図-12は開口率50%の条件に着目して無次元波圧強度 p_{max}/w_0H_{max} と無次元天端高さ $h_c/(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3}$ の関係を整理したものである。無次元天端高さが小さくなるにつれて越波流量が低減するため、防波フェンスへの作用力も低減する傾向にあることが確認された。この図から現地の波浪条件や天端高さ条件に基づいたフェンスの支柱等の部材設計が可能となる。

6. 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現地観測した飛沫は、波高水深比が大きい条件ほどスリット部に比べて後壁部における打ち上げ高さの方が卓越していた。また、その値は既往の提案値を上回る傾向にあることを確認した。
- ②越波流量については提案している算定値と概ね一致することを確認した。また、護岸背後域における越波水

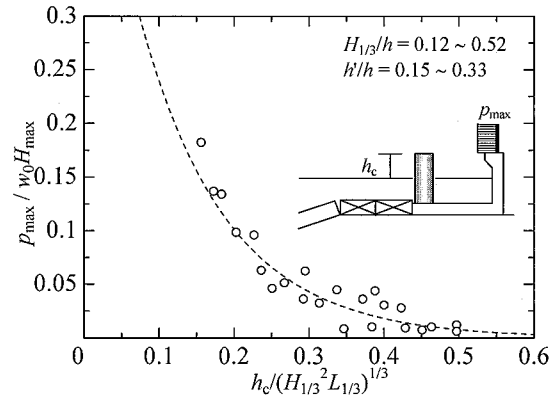


図-12 フェンスへの作用波力

の水平分布特性を明らかにした。

- ③大型断面水路を用いた水理模型実験を実施して防波フェンスへの作用波圧に及ぼす開口率および天端高さの影響を明らかにした。

本報告で示した水理模型実験の実施に当たっては留萌港湾事務所（前寒冷沿岸域チーム）の山口圭太技官の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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, pp. 285-305.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江 功(1973): 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報), 第20回海講論文集, pp. 113-118.
- 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・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.
- 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.