

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

森 昌也¹・山本泰司²・山口圭太³
木村克俊⁴・田端恵士⁵・須藤賢哉⁶

消波型高基混成堤は通常の混成堤よりも高い基礎マウンドとスリット形式の直立部により高い消波能力を実現した構造形式である。この構造は北海道森港の防波護岸として全国で初めて採用され、現地施工にあたっては、波圧観測用の堤体を1函設置して現地観測を実施した。その結果、直立部に作用する無次元波圧強度は潮位の増加とともに増大することが確認された。また、スリット部では提案値を上回る波圧が観測されたのに対し、後壁部の作用波圧は提案値とほぼ一致していた。施工中の現地において設計波を大きく上回る波浪を受けてわずかな滑動が生じた。滑動が生じた原因として、スリット部に作用する提案値を上回る波圧のほか潮位の影響が考えられた。

1. はじめに

消波型高基混成堤は、図-1に示すように通常の混成堤よりも高い基礎マウンドとスリット形式の直立部により高い消波能力を実現した構造形式である。高い基礎マウンド上で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、高マウンドゆえに生じる衝撃波力を、円柱形式を用いたスリット部によって緩和することができる。さらに、水深が浅く広いマウンド部分は藻場育成に適しており、現地調査により良好な海藻群落が形成されていることが二ノ宮ら(2003)によって報告されている。

消波型高基混成堤の水利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、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利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おり、前面マウンド被覆材の安定性については森ら(2001)が水利模型実験からマウンド水深などの影響を考慮した被覆ブロックの安定質量算定法を提案している。また、波力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。

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、その構造諸元の決定過程および現地施工状況については著者らが報告しているところである(山本ら, 2004)。現地施工にあたっては、作用する波圧特性を把握することを目的として波圧観測用の堤体を1函設置して現地観測を実施している。

本研究では、森港を想定した水利模型実験および森港において実施した波圧の現地観測から直立部に作用する波力特性について報告するとともに、2004年2月に森港において生じた滑動事例について考察するものである。

2. 波力特性に関する水利模型実験

(1) 既往の波力に関する検討

消波型高基混成堤に作用する波力特性については、下迫ら(2003)が現地の1/25程度のスケールを想定した小型模型実験および1/4程度を想定した大型模型実験を実施してマウンド肩幅などが波力特性に与える影響について報告している。さらに、これらの実験結果からスリット部に作用する波力が最大となる位相(Phase-1)および後壁に作用する波力が最大となる位相(Phase-2)、引き波時の波力が最大となる位相(Phase-3)における設計波圧分布を提案している。提案されている波圧分布は波高のみの関数として、無次元波圧強度 p/w_0H_D (p :波圧, w_0 :海水の単位体積重量, H_D :設計波高)をPhase-1のスリット部で0.35, Phase-2の後壁部で0.6の値を等分布荷重として与えている。ただし、下迫ら(2003)の実施した波圧実験の結果からは提案値を上回

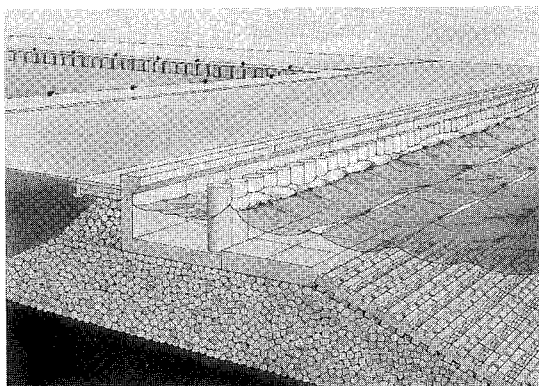


図-1 消波型高基混成堤

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 北海道開発局 留萌開発建設部 羽幌港湾事業所
4 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
5 修(工) 国土総合建設株式会社(前 室蘭工業大学大学院)
6 北海道開発局 函館開発建設部 築港課

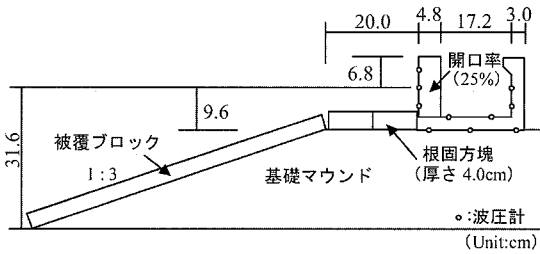


図-2 実験断面

る波圧が観測されているが、その値を静的荷重として与えることは過大であるとして、滑動実験や部材に生じるひずみ量に基づいて低減させた値を提案している。また、水深（潮位）とマウンド形状が一定の条件を満足すれば、直立部には碎波後の波が作用するため、周期の影響は少ないとしている。以降の検討においてはこの提案されている波圧分布を基本として、模型実験および現地観測との比較を行う。

(2) 水理模型実験の方法

実験は二次元造波水路（長さ 24.0 m、幅 0.8 m、深さ 1.0 m）を用い、1/30 勾配の水路床上に森港消波型高基混成堤の断面形状を 1/25 のスケールで再現し、波圧および滑動量を測定した。図-2 は実験断面を示しており、実験水深は現地の H.W.L. にあたる 31.6 cm とし、マウンド水深は 9.6 cm、マウンド肩幅は 20.0 cm とした。実験には 10 年確率波に相当する波浪を用い、滑動量測定実験は不規則波、波圧測定実験は最高波高に相当する規則波を作用させた。不規則波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し、有義波高 $H_{1/3}$ は 7.6 cm、有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.0 s とし、規則波は波高 $H=14.0$ cm、周期 $T=1.0$ s とした。波圧測定実験では、図-2 に示すように堤体に取り付けた波圧計により、サンプリング周波数 200 Hz で測定した。

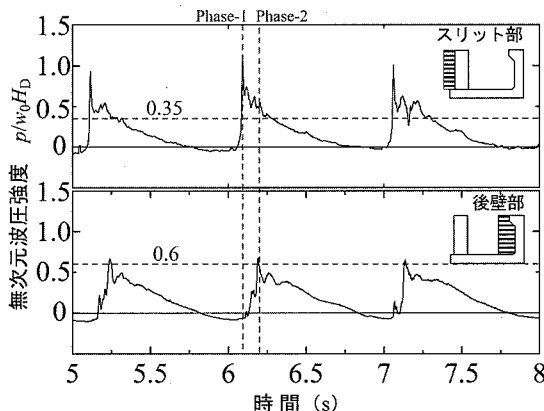


図-3 時系列の波圧波形

滑動実験においては、堤体重量を段階的に変化させたときの滑動量を堤体背後に設置した変位計により測定した。

(3) 波力特性

図-3 は波高 14.0 cm、周期 1.0 s の規則波を作用させたときのスリット部および後壁部に作用する波圧合力の断面平均値から算定した無次元波圧強度 $p/w_0 H_D$ の時系列波形を示している。図中の破線は提案されている無次元波圧強度の値を示しているが、スリット部においては無次元波圧強度 $p/w_0 H_D$ で 1.0 程度の提案値を上回る波圧が作用している。これに対して、後壁部については、おおむね提案されている無次元波圧強度 0.6 に近い値を示している。また、スリット部および後壁部に作用する波圧合力には位相差が生じており、Phase-1 および Phase-2 を確認できる。

図-4 は滑動量と堤体幅の比 x/B_c と、実験堤体重量 W_{exp} と提案されている波圧分布から算定した堤体重量 W_{cal} の比 W_{exp}/W_{cal} の関係を示している。 W_{exp}/W_{cal} の値が 1.0 よりも大きい条件においては滑動量が落ち着く傾向にあるが、 x/B_c の値が 0.01 程度のわずかな滑動は生じていることが分かる。滑動量と波圧を同時に測定していないため、どの位相において滑動が生じたかは判断できないが、波圧波形の結果で示したように、スリット部において提案値以上の波圧が作用していることが原因と考えられる。

3. 現地における波圧観測

森港は北海道内浦湾の南部に位置する地方港湾であり、係留施設の不足を解消するために平成 10 年より図-5 に示す新川地区の整備が進められてきた。同地区の防波護岸 170 m の区間においてコストの縮減や反射波の低減を目的として全国で初めて消波型高基混成堤が採用された。本護岸は平成 14 年から施工を開始し、本体直立部ブロックについては平成 16 年 8 月に全 34 函の据付が完

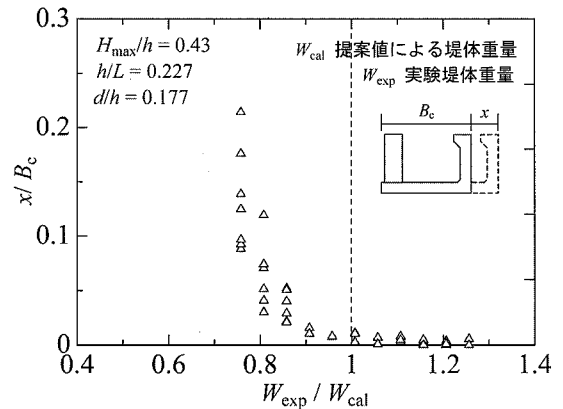


図-4 堤体重量と滑動量

了している。

波圧の現地観測を行うにあたり、現地施工箇所の西護岸側から40m地点の堤体1函を波圧観測用として施工した。図-6は波圧観測用の堤体における計測器の設置状況を示している。観測に用いた波圧計は前面の円柱スリットに6点、後壁に2点、床版上面に2点、揚圧力用に2点の合計12点に設置している。観測に用いた計測器はケーブルで陸上の観測局舎につながっており、サン

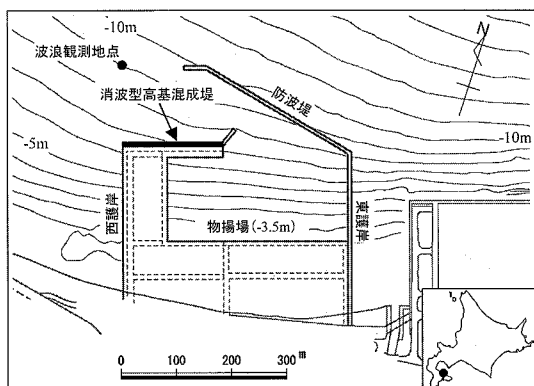


図-5 森港新川地区の施設配置

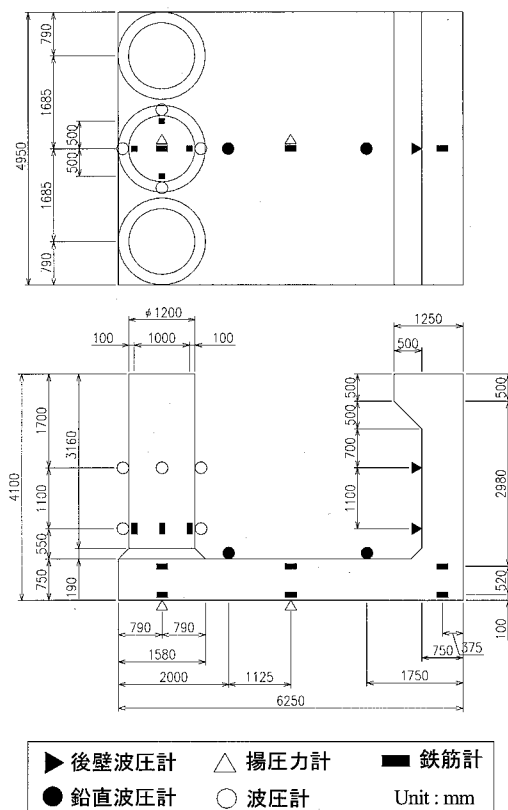


図-6 計測器の配置

プリング周波数 50 Hz でデータを収集した。また、波圧観測とともに護岸前面から 140 m 程度離れた水深 9 m の地点において水圧式波高計による波浪観測を実施した。波浪観測は毎正時 20 分間の観測でサンプリング間隔は 0.5 s としている。

観測期間は 2005 年 12 月 22 日から 2006 年 3 月 20 日までの 91 日間であるが、解析結果を整理したのは有義波高がある程度大きな値となった 2005 年 12 月 26 日、2006 年 2 月 2 日および 3 月 20 日に観測された最高波高が 1.0 m 以上のデータとした。この間の来襲波浪の有義波周期は $T_{1/3}=3.7\sim5.4$ s であり、波向きは堤体に対しほぼ直角入射であった。

4. 現地観測結果

(1) 波圧波形と波圧分布

図-7は観測期間において有義波高 $H_{1/3}$ が最も大きな値となった 2005 年 12 月 26 日の 12 時における各部材に作用する波圧合力の断面平均値から算定した無次元波圧強度 $p/w_0H_{\max}$ の時系列波形の一例を示している。この時刻の有義波高は $H_{1/3}=1.63$ m, 有義波周期は $T_{1/3}=5.0$ s であった。スリット部および後壁部のピーク値に着目するとスリット部に作用する波圧合力が最大 (Phase-1) となつてから、0.97 秒後に後壁に作用する波圧合力が最大値 (Phase-2) を示しており、水理模型実験の結果と同じく作用する波圧に位相差が生じていることが分かる。ここでは、揚圧力および床版部に作用す

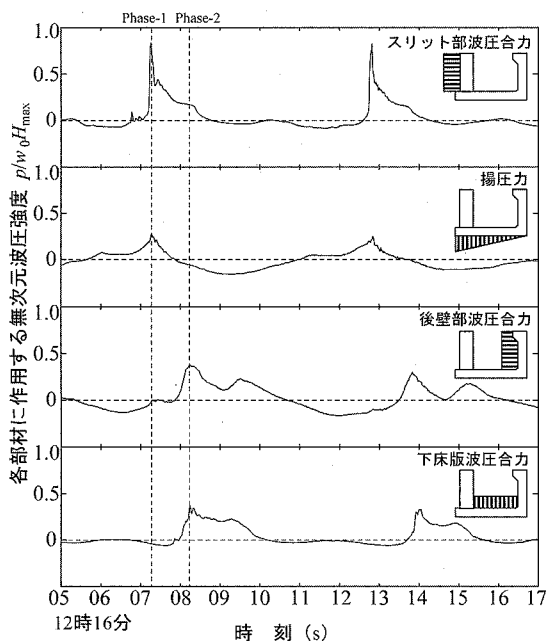


図-7 波圧合力の波形

る波圧合力も示しているが、揚圧力はスリット部のピークと、床版部は後壁部のピークとほぼ一致している。波圧波形をみるとスリット部の無次元波圧強度は0.85程度であるのに対して、後壁部は0.35程度であり、後壁部の波圧が低減しており、スリット壁による波圧の低減効果が確認できる。

図-8は有義波高 $H_{1/3}$ が最も大きな値となった12月26日の12時において、スリット部の波圧合力が最大となった時刻 (Phase-1) および後壁部の波圧合力が最大となった時刻 (Phase-2) における同時波圧分布を示している。ここで、観測結果は無次元波圧強度 $p/w_0H_{\max}$ で示しており、図中における破線は提案されている波圧分布である。その結果、Phase-2においては揚圧力が小さい値となっている以外は、後壁部および床版部ともに提案されている分布に近い値を示している。これに対して、Phase-1ではスリット部において提案されている無次元波圧強度よりも大きな値が生じている。

(2) 潮位が作用波圧に与える影響

図-9, 10はスリット部および後壁部に作用する無次元波圧強度 $p_{\max}/w_0H_{\max}$ と波高水深比 $H_{\max}/h$ の関係を潮位のランクごとに示したものである。ここで、無次元波圧強度は毎正時20分間に観測された波圧合力の最大値から算出しており、潮位はL.W.L.上の値を示している。潮位のランクに着目するとばらつきはあるが、スリット部および後壁部ともに潮位のランクが大きくなるにつれて無次元波圧強度の値も増大する傾向にある。提案されている波圧分布は波高のみの関数であるが、潮位の影響によっても作用波圧は変化している。

図中の破線は提案されている無次元波圧強度の値を示している。後壁部についてはすべての潮位ランクにおいて提案値以下であり提案値が安全側の値を与えていることが分かる。スリット部については、潮位ランクが0.5m以下の条件においては、提案値以下の値を与えているが、0.5m以上の条件においては、前述の波圧実験結果と同様に提案値を大きく上回る波圧が作用していることが明らかになった。

5. 現地における滑動事例

2004年2月23日に低気圧が北海道付近を通過したのに伴い、森港においても高波浪が来襲し、写真-1に示すように施工中の堤体が一部滑動した。この時点においては消波型高基混成堤の背後の埋め立てが未施工であったため、既に据付が完了していた直立部28函のうち3函において0.12~0.23mのわずかな滑動が生じたもの

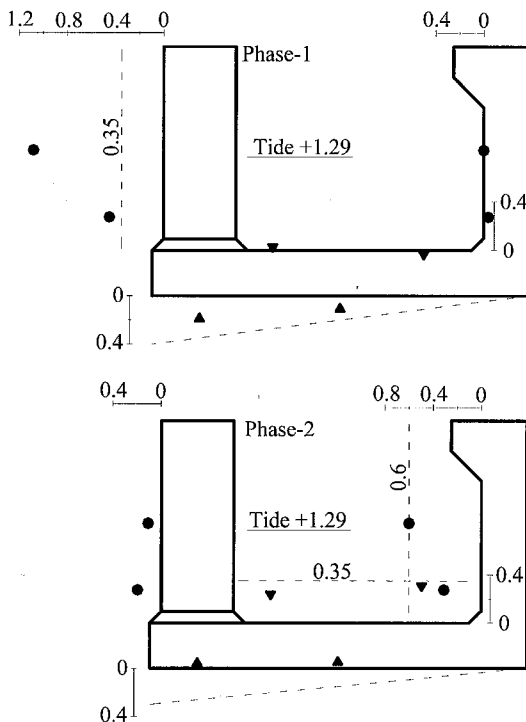


図-8 各位相の同時波圧分布

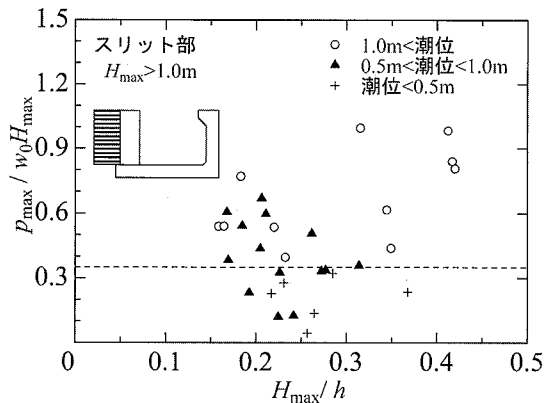


図-9 無次元波圧強度 (スリット部)

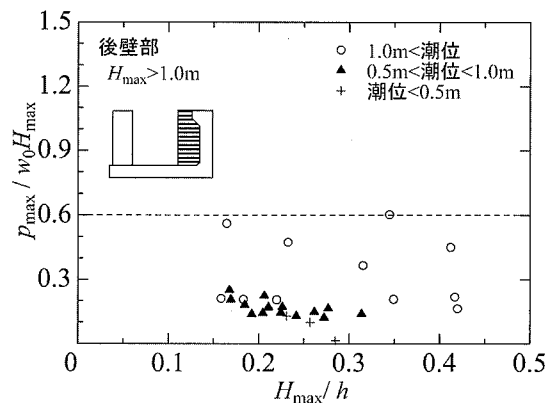


図-10 無次元波圧強度 (後壁部)

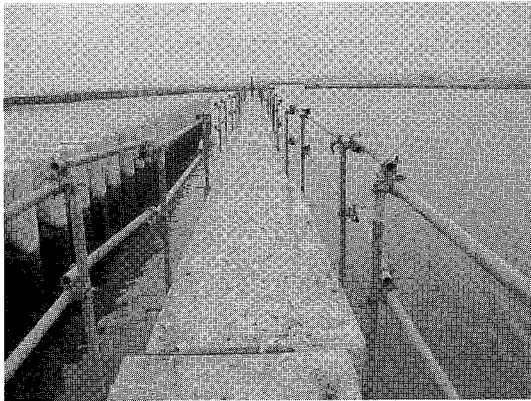


写真-1 直立部の滑動被害の状況

である。図-11は森港において当日観測された波浪および潮位の時系列変化を示している。ここで、潮位はL.W.L.上の値を示す。最高波高 $H_{\max}$ が最も大きな値となった13時において観測された有義波高は $H_{1/3}=2.5\text{m}$ 、最高波高は $H_{\max}=5.0\text{m}$ であり、本施設の施工時の安定性評価に用いた10年確率波($H_{1/3}=1.9\text{m}$, $H_{\max}=3.5\text{m}$)をかなり上回る波浪が作用した。なお、このときの波向はNNWであり概ね護岸に対して直角に入射していた。

提案されている波圧分布によって、最高波来襲時の堤体の滑動安全率を計算したところ、Phase-1では1.15、Phase-2では1.20となり1.0を下回らないことから、提案されている波圧分布ではこの滑動被害を説明できない。ただし、前述のとおり、滑動実験の結果から堤体重量が安全率1.0よりも大きい条件においても、 x/B_c の値が0.01程度のわずかな滑動が生じることを確認している。また、現地波圧観測の結果から作用波圧は潮位の影響を受けており、潮位のランクが0.5m以上の条件においてはスリット部で提案値以上の値が作用することを確認している。最高波高が最も大きくなった時刻における潮位は+0.85mであったことから、Phase-1のスリット部においては提案されている以上の波圧が作用し、わずかな滑動が発生したと考えられる。

今回の滑動被害は、設計波を大きく上回る波浪が作用したことが直接の原因ではあるが、わずかな法線のズレが目立つような施設においては、施工中の安定性の検討には十分配慮する必要がある。なお、今回の現地観測では、鉄筋のひずみも計測しているが、提案されている設

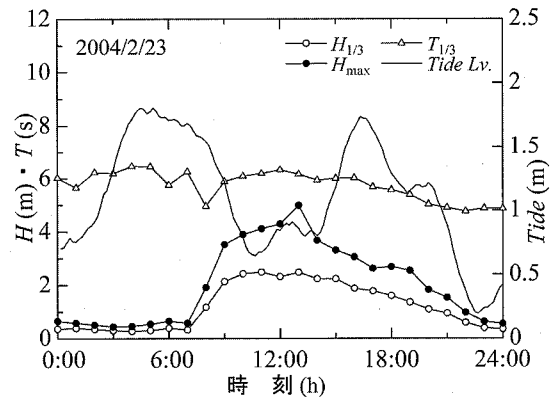


図-11 被災時の海象条件

計波圧を部材設計に用いることは問題ないことを確認している。

6. まとめ

本報告の主要な結論を示すと以下になる。

- ① 現地における波圧観測の結果から、スリット部および後壁部に作用する無次元波圧強度は潮位の増加とともに増大することが確認された。
- ② スリット部では提案値を上回る波圧が観測され、部材応答特性等を考慮して低減させた提案値では、波圧が過小となる場合があることが明らかとなった。これに対し、後壁部の作用波圧は提案値とほぼ一致していた。
- ③ 現地において設計波を上回る波浪を受けてわずかな滑動が生じた。その原因としては、スリット部に作用する提案値を上回る波圧や潮位の影響などが考えられた。

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, 海講論文集, 第46巻, 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.
- 二ノ宮清志・須藤賢哉・北原繁志(2003): 高基混成堤における環境調和機能について(第一報), 第47回北海道開発局技術研究発表会発表論文集, 港-11. (CD-ROM)
- 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, 海講論文集, 第48巻, pp. 906-910.
- 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.