

大水深域における非越波型護岸の開発

山城 賢* ・ 吉田 明徳** ・ 久留島暢之***
井ノ口洋平*** ・ 入江 功****

人工島護岸などの沖合の護岸では、波の不規則性に起因して突発的に大きな打上げや越波が生じる。これを従来の直立護岸で防ぐためには天端高を相当に高くする必要があり現実的ではない。本研究では、沖合の大水深域を対象に不規則波による護岸前面の打上げ特性の把握と、完全非越波を実現する護岸断面の開発を試みた。その結果、まず、不規則波による打上げは大部分がレーリー分布に従うことを確認した。次いで、大部分の打上げには天端高で対処し、突発的な打上げには護岸上部を曲線にして波を沖向きに返すことで対処するという考えで幾つかの護岸断面を試作し、実験によりこれらの断面が直立護岸に比べ極めて高い越波防止機能を有することを示した。

1. はじめに

近年、空港などの広大な用地を必要とする施設を、沖合に建設する事例が増加しており、この傾向は、今後さらに強くなることが予想される。その場合、沖合の荒波による越波を極力防ぎ、施設とその機能を守ることが重要となる。しかし、沖合では波の不規則性が強く、護岸前面で突発的に大きな波の打上げが生じることがあり、そのような不規則波中の例えば 1 波の越波でも被災する恐れがあることが指摘されている(井上ら, 1988)。しかしながら、従来の直立護岸で突発的な打上げとそれに伴う越波を防ぐためには、天端高を相当に高くしなければならず、建設費の増大や航空機の離着陸に支障をきたすなどの問題が生じる。

一方、浅海域では、低天端非越波型護岸(フレア型護岸)の開発に関する研究が活発に行われ(例えば、上久保ら, 1999)、実際に施工段階にある(図-1 参照)。フレア型護岸は、砕波後の段波状に來襲する波を、円弧状の断面により沖向きに返すことで低天端を実現するもので、その断面形状は護岸の安定性、鉛直波力の低減、飛沫の抑制等を考慮して決定されている。このフレア型護岸を直接沖合に適用すると、直立護岸に比べて、ある程度の越波防止効果は認められる(村上ら, 1999)。しかしながら、沖合では護岸前面で重複波が形成されるため、フレア型護岸本来の機能が十分発揮されず、高い越波防止効果は望めない(Yamashiro ら, 2002)。

そこで、本研究では、沖合(水深 20~30 m 程度)を対象に、まず、不規則波による直立護岸前面での波の打上げ特性について水理模型実験により検討し、そこで得られた知見をもとに、大水深域において完全非越波を実現するための護岸断面形状の開発を試みた。

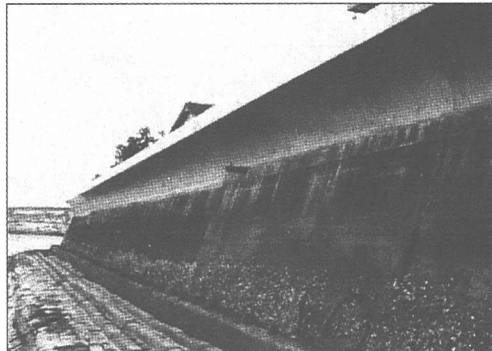


図-1 フレア型護岸を応用した護岸(熊本県本渡瀬戸)

2. 打上げ特性の把握

(1) 実験条件

実験には図-2 に示す、長さ 20.0 m、高さ 1.2 m、幅 0.6 m の二次元反射吸収式造波水路を用いた。水路内に不透透マウンドを設置し、その上に直立護岸および傾斜護岸(傾斜角は 10° および 20°)を設置して、不規則波を入射させ護岸前面の打上げ高を容量式波高計により計測した。入射波は Bretschneider-光易型スペクトルを想定し、有義周期 $T_{1/3} = 1.25$ s と固定して有義波高 $H_{1/3}$ を変化させた。水深 h は 50 cm、マウンド上の水深は 26 cm と一定とした。マウンド形状は、打上げや越波に大きく影響する要因の一つであり、マウンド形状と越波や衝撃波との関連について検討した研究は数多くある(例えば、谷本ら, 1976; 高橋ら, 1992)。本研究においても、マウンド形状と打上げ特性等との関連について検討する必要があるが、今回は現地の設計例を参考にマウンド形状を一定とした。なお、入射波の有義周期についても同設計例における設計波(50 年確立波)を参考にしている。

不規則波による打上げ高さ(特に最大打上げ高)を計測するためには数多くの波を作用させる必要がある。しかしながら、高反射性の構造物を対象に不規則波を作用させる実験では、反射波吸収機能を有する造波機を使用

* 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院

** 正会員 工 博 九州大学助教授 大学院工学研究院

*** 学生会員 九州大学大学院工学府

**** 正会員 工 博 九州大学教授 大学院工学研究院

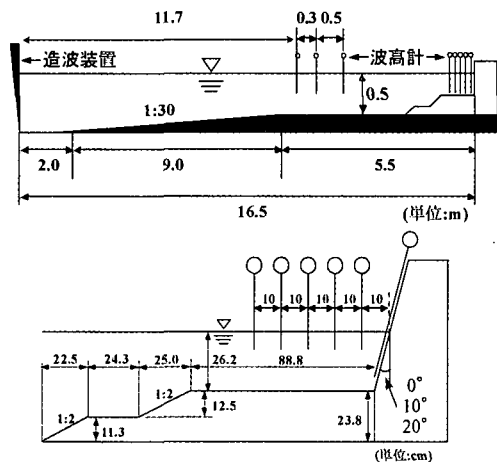


図-2 実験装置

し、多重反射をある程度許容しても、安定した実験結果が得られるのは、造波開始後数分程度までに限られる。そこで、予め、同一のスペクトルから20種類の時系列を作成し、直立護岸に作用させて、打上げ高の比較を行った。図-3に護岸壁面で計測した水位変動(静水位上)の例を示す。図より、護岸壁面に沿う水位変動は作成した時系列信号により大きく異なり、右上の図に示すケースでは、造波開始後約180秒で大きな打上げが生じている。この打上げ高は20ケース中最大であり、また、造波開始後の比較的早い時間で発生することから、以後の実験においては、このケースの時系列波形を入射波として採用した。なお、成分波の位相の組合せを同じに設定し、入射波高を変化させた場合も、同様に大きな打上げを生じを確認している。

(2) 不規則波による波の打上げ特性

まず、不規則波に対する護岸前面の打上げ高についての統計的な性質を調べた。図-4は直立護岸に対する打上げ高をゼロアップクロス法で読取って得られたヒストグラムの一例である。図のヒストグラムは正規化されており、 R_m は打上げ高の平均値である。また、レーリー分布とその超過確率を併せて示している。大部分の波の打上げ高はレーリー分布に従っていることがわかる。しかし、本実験で対象としている最大打上げは、レーリー分布では極めて稀にしか生じない現象といえる。この打上げによる越波を通常の護岸で防ぐためには、相当な天端高が必要となり現実的ではない。したがって、この突発的に生じる大きな打上げを防ぐためには何らかの工夫が必要となる。

次いで、入射波高に対する最大打上げ高を図-5に示す。横軸は有義波高 $H_{1/3}$ と水深 h の比 $H_{1/3}/h$ であり、縦軸は最大打上げ高 R_{max} と水深 h の比 R_{max}/h である。入

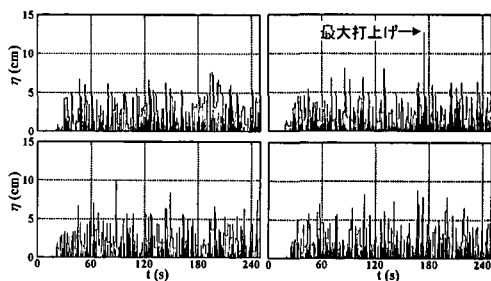


図-3 同スペクトルから作成した異なる時系列波形による直立護岸壁面の水位変動(静水位上)

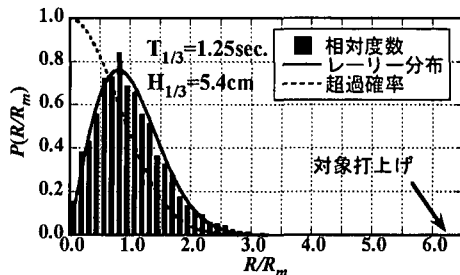


図-4 打上げ高のヒストグラム

射波高に対する打上げ高の変化の様子は、三段階に分かれていることがわかる。入射波高が小さい領域Ⅰでは、打上げ高は入射波高に比例して増大する。ところが、領域Ⅱでは直立護岸と10°傾斜護岸の場合、入射波高の増大に対して打上げ高はほぼ横這いとなっており、また、20°傾斜護岸についても、領域Ⅱの後半から領域Ⅲの最初の部分で、打上げ高が横這いになるという興味深い傾向を示している。さらに、暴浪時に相当する領域Ⅲでは入射波高が僅かに増すだけで打上げ高が急激に増大することがわかる。図-6に直立護岸壁面から10cm沖側の位置における、最大打上げが発生する直前の水位変動を示す。この水位変動には入射波と護岸からの反射波が含まれており、そのままの波形で護岸に作用するわけではないが、入射波高の増大に伴い明らかに水面の勾配が急になっており、特に、図-5の領域Ⅱと領域Ⅲの境界となる有義波高 $H_{1/3}/h=0.098$ と $H_{1/3}/h=0.102$ で急激に水面の勾配が変化している。したがって、護岸に不規則波が作用すると、成分波の大きさと位相差により、護岸前面で瞬間的に波形勾配が大きくなることがあり、その結果、波が護岸に衝撃的に作用して大きな打上げが生じるものと思われる。

また、図-5の領域Ⅲにおいて、傾斜した護岸の打上げ高は直立護岸に比べて低い。これについて、実験時の様子から考察する。図-7は $H_{1/3}=5.5$ cm ($H_{1/3}/h=0.11$) における最大打上げ時の様子である。打上げの水面形は護岸の僅かな傾斜により大きく異なり、直立護岸では、

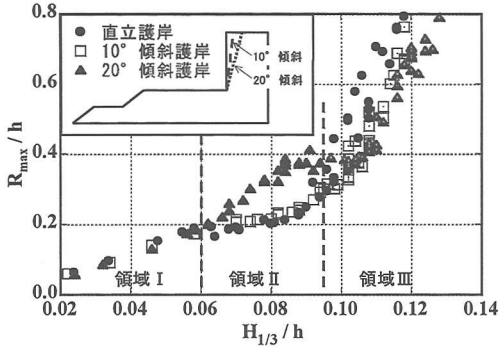


図-5 入射波高に対する打上げ高

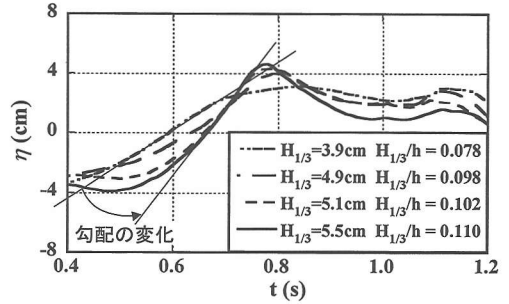


図-6 直立護岸前面 (10 cm 沖) の水位変動

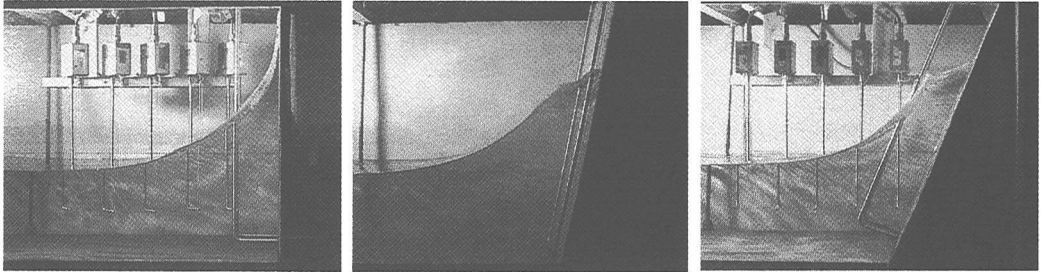


図-7 最大打上げ時の様子 ($H_{1/3}=5.5$ cm 左:直立, 中:10°傾斜, 右:20°傾斜)

打上げの先端が鋭く上方に伸びているのに対し, 10°および 20°傾斜護岸では, 打上げの先端が丸く到達点も低い。図-6 の水面の勾配と併せて考えると, 護岸が傾斜していることにより, 護岸壁面に対する来襲波の水面の勾配が相対的に緩くなることで衝撃的な作用が緩和され, その結果, 打上げ高が低く抑えられるものと思われる。

3. 非越波型護岸断面の開発

(1) 打上げ特性を考慮した護岸断面

不規則波による打上げの検討の結果, 図-4 のヒストグラムに示したように, 大部分を占める重複波的な打上げに対しては天端高で対応せざるを得ないものと思われる。しかし, 突発的に生じる大きな打上げは, 入射波高の数倍以上になるため, 現実的に天端高では対応できない。そこで, 浅海域のフレア型護岸を参考に, 護岸断面の上部を曲線として水塊を冲向きに返すことで, 大水深域において非越波を実現することを考えた。図-8 に本研究で考案した護岸断面形状の概略を示す。断面下部については, 前述の打上げ高の検討より, 直立壁ではなく若干傾斜した断面とし, 上部は下部から滑らかに接続する曲線とする。この断面形状を具体的に決定するためには, 下部の傾斜角 ($\theta 1$), 直線部の高さ ($D1$), 曲線部の高さ ($D2$), 射出角 ($\theta 2$) および射出部の水平方向位置 (P) を適切に決定する必要がある, そのためには, 形状が異

なる断面について数多くの実験を行い断面決定に必要な知見を得る必要がある。

(2) 実験条件

図-9 に示す 3 通りの断面形状について模型を作成し, 越波防止機能を把握するための実験を行った。図-9 に示す断面は越波をある程度許容する既存の直立護岸の設計例と天端高を同じにとり, 左の 2 つは天端高の 2/3 を曲線部としたもので射出角を 20°と 45°にしている。また, 右の断面は左の断面 (射出角 20°) の曲線部を 1/2 に縮小したものである。なお, 現段階で最適な曲線の形状は明らかではないため, 本研究においては, 曲線部に簡単な放物線を採用した。また, いずれの護岸も断面下部については, 図-5 の結果より 10°傾斜させている。この

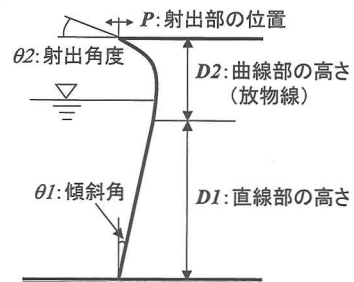


図-8 考案した断面形状の概略

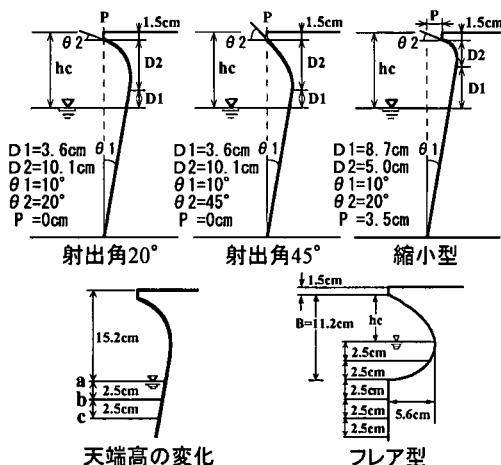


図-9 実験に用いた断面形状

3つの断面に加え、浅海域を対象に開発されたフレア型護岸をそのまま適用した断面の模型(図-9右下)を用い、計4つの断面について実験を行った。実験は図-9の下図に示すように、模型を底上げすることで天端高 h_c を3通り(フレア型護岸は6通り)に変化させ、それぞれの天端高について、不規則波(有義周期 $T_{1/3}=1.25$ s, 有義波高 $H_{1/3}$ は変化)を作用させた。そして、それぞれの断面について非越波限界波高 H_c (越波を生じない限界の有義波高)を目視およびビデオ画像により判定した。ここでいう非越波限界波高 H_c は、完全に越波が生じない最大の入射波高と定義しており、実験においては、僅か数滴程度でも天端上に水滴が落ちれば越波と見なした。なお、実験に用いた水槽および水深、マウンド形状、入射波等の条件は、前述の打上げ特性に関する実験と全て同じである。

(3) 越波防止機能の比較

図-10に天端高に対する非越波限界波高を示す。図中の「直立護岸」は図-5に示す直立護岸の最大打上げ高を比較のために示したもので、図-5の縦軸と横軸を入れ替えて表示した形になっている。図より、フレア形状を適用した護岸では、直立護岸に対して高い越波防止効果は得られていないことがわかる。ただし、ここで用いたフレア形状(フレア型護岸の曲線部)は概ね適当と思われる大きさに設定(水深を20 mとすると、曲線部は約4.5 m)したもので、曲線部をより大きくすることにより越波防止効果は向上することを確認している(Yamashiroら, 2002)。しかしながら、大水深域で、巨大な曲線部を有するフレア型護岸を建設することは極めて困難であると予想される。一方、本研究で考案した断面についてみると、直立護岸およびフレア型護岸に比べ、格段に越波防止効果が高く、低い天端高で非常に大きな打上

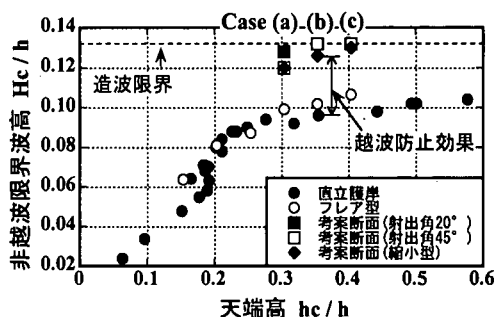


図-10 非越波限界波高の比較

げを阻止できるといえる。なお、図中に示す天端高 $h_c/h=0.35$ のCase (b) および天端高 $h_c/h=0.40$ のCase (c)において、射出角 20° および 45° の断面では、使用した造波機で起し得る最大波高の波に対しても越波を生じず、正確な非越波限界波高は求められなかった。したがって、実際の非越波限界波高はさらに高い。また、考案断面で越波防止効果を比較すると、射出角 20° 、射出角 45° 、縮小型の順となる。

断面形状の違いによる越波防止効果の差について検討する。図-11にフレア型護岸、射出角 20° および射出角 45° のそれぞれにおける最大打上げ時の様子を示す。なお、図に示す条件は、天端高 $h_c/h=0.30$ のCase Aで、フレア型護岸では越波が生じており($H_{1/3}/h=0.1$)、射出角 20° および 45° の断面は、いずれも非越波($H_{1/3}/h=0.12$)である。図より、フレア型護岸の場合、流体が下方から鉛直上向きに移動し、曲線部に滑らかに導入されず、曲線部の上部に激突する。その後、曲線部は流体に満たされ、同時に射出部から水塊が冲向きに返されようとするが、護岸前面の上部にまで波が到達するため、水塊の一部は押し戻され天端上に流れ込む。したがって、フレア形状では、重複波領域における打上げに対して、本来の越波防止機能が十分発揮されないことがわかる。これに対し、本研究で考案した断面では、下部から射出部までが滑らかに連続しているため流体は護岸壁面に沿って流れ、水塊を冲向きに返しており、越波防止機能が十分に活かされている様子がわかる。また、図のように断面に対して大きな波が来襲する場合、流体が断面を覆うようになり、天端付近で射出方向の流れと岸向きの流れが生じて、そのため水塊は射出方向よりも若干岸寄りに放出される。射出角 20° に比べて射出角 45° の断面は射出方向が上方を向いているため、より岸寄りに水塊が射出される。これにより、両者の非越波限界波高に差が生じているものと考えられる。

図-12に縮小型(射出角 20° の曲線部を1/2にした断面)における最大打上げ発生時の様子を示す。このときの条件は、図-11に示す射出角 20° および 45° の条件と同

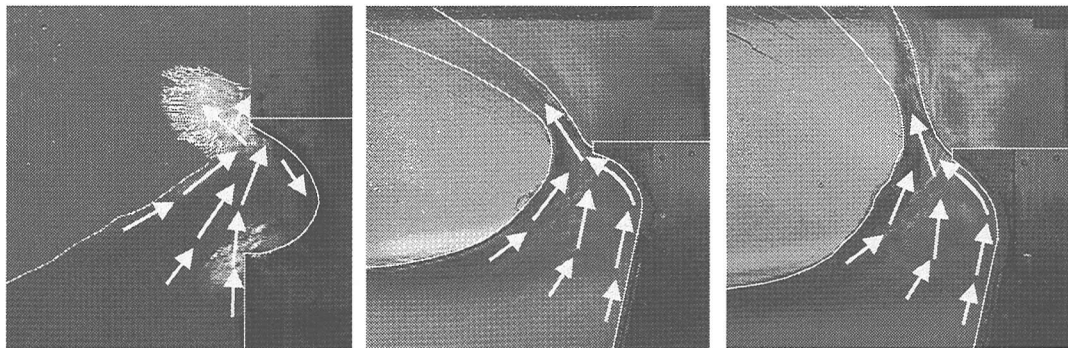


図-11 最大打上げ時の様子 (左：フレア型護岸 (越波)，中：射出角 20° (非越波)，右：射出角 45° (非越波))

じ、天端高 $h_c/h=0.30$ (Case A) で、非越波 ($H_{1/3}/h=0.12$) である。図より、縮小型では打上げがほぼ垂直に生じている様子がわかる。前述の通り、波を返す向きは射出される水塊と、さらに押し寄せてくる水塊との圧力差により決まる。縮小型は曲線部が小さいため、沖向きに返される水塊は、図-11 の 2 つの考案断面に比べて明らかに少なく、水塊の大部分は護岸に覆い被さるように来襲し、水塊の射出方向がほぼ垂直になる。更に大きな波が来襲すると、水塊の射出方向は岸向きになり越波を生じる。

以上の考察の結果、直立護岸では入射波高がある程度大きくなると、波高の僅かな増加に対し越波を防ぐために必要な天端高は格段に増加する。これに対し、本研究で考案した断面は極めて高い越波防止機能を有しているといえる。また、本研究の範囲では、射出角が小さく、曲線部が大きいくほど越波防止には効果的といえる。

4. おわりに

大水深域を対象に、不規則波による直立護岸前面の打上げ特性について検討し、打上げの大部分は重複波的でレーリー分布に従うこと、稀に極めて大きな打上げが生じることを確認した。次いで、通常の打上げは天端高さを確保することで対処し、突発的に生じる大きな打上げは護岸上部を曲線にして対処するという考えで護岸断面を考案して、これらの断面が極めて高い越波防止機能を有することを示した。ただし、与えられた条件に対し最適な断面形状を決定するには、断面下部の傾斜角、直線部の高さ、曲線部の高さ、上部先端の射出角および射出部の水平位置を適切に設定する必要があり、今後は、護岸に作用する波力や護岸の安定性および射出水塊の挙動等を考慮して水理実験や数値シミュレーションを行い、最適断面形状の決定法について検討する必要がある。

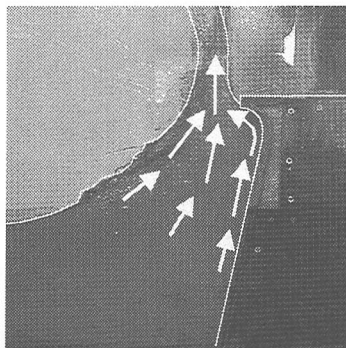


図-12 最大打上げ時の様子 (縮小型 (非越波))

謝辞：本研究を行うにあたり、フレア型護岸について八代高等専門学校の上久保助手には多くのご指導とご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 井上雅夫・島田広昭・本田清高・殿最浩司 (1988): 不規則波の越波量分布, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 582-586.
- 上久保祐志・入江 功・村上啓介・神田一紀・片岡保人・濱崎義弘 (1999): 浅海域を対象とした非越波防護護岸断面の基礎的特性, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 25-30.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 676-680.
- 谷本勝利・高橋重雄・轟 正彦 (1976): マウンド形状による衝撃碎波力の発生について, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 6-10.
- 村上啓介・片岡保人・竹鼻直人・小長野幸・上久保祐志 (1999): フレア型護岸の大水深域への適用における護岸水理特性の検討, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 1-6.
- Yamashiro, M., A. Yoshida, Y. Inokuchi and I. Irie (2002): Non Wave-Overtopping Effect of Flaring Shaped Seawall in Deepwater, TECHNO-OCEAN 2002 Proceedings, CD-ROM.