

# 海岸構造物周辺の洗掘の定量的評価

山田 浩次\* ・ 田辺 勇人\*\* ・ 鳥居 謙一\*\*\* ・ 加藤 史訓\*\*\*\*  
山本 吉道\*\*\*\*\* ・ 有村 盾一\*\*\*\*\* ・ Vu Thanh Ca\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

海岸・海域に構造物を設置すると、その周辺で波と流れによる洗掘が生じ、高波が続いて、洗掘量が大きくなると、構造物の被災(洗掘による直接的な沈下や傾斜化、水深増大に伴う波力増加による破壊や傾斜化)に至る。それゆえ、洗掘規模(最大洗掘量や洗掘範囲)を正確に予測し、効果的かつ経済的な対策を立案することは海岸・海域構造物が所要の機能を維持するために重要である。

局所洗掘の発生機構は非常に複雑であるが、設置水深の違いによって碎波に伴うものと重複波によるものの大きく2つに大別でき、これまで多くの実験的研究がなされている。

佐藤ら(1966)、榎木ら(1960, 1974)は2次元造波水路を用いた実験によって直立壁堤脚部の洗掘機構を検討し、洗掘量の時間的変化の観点から、(I)急激に掘れた後、埋まる、(II)急激に掘れた後、そのままの状態が続く、(III)急激に掘れた後、徐々に掘れる、(IV)初めから徐々に掘れる4つにタイプに分類できることを示した。そして、榎木ら(1974)はタイプ(III)に着目し、2次元造波水路による直立壁堤脚部での洗掘実験によって波による質量輸送の影響について考察している。また、入江ら(1984)は2次元造波水路による直立壁前面での重複波に着目し、重複波の腹の位置に堆積するタイプ(L-タイプ)と節の位置に堆積するタイプ(N-タイプ)の2つの異なった局所洗掘機構とその発生条件を明らかにしている。さらに、栗山ら(1987)は3次元造波水路を用いて斜め入射重複波による直立防波堤前面の洗掘特性を検討している。

しかし、実験や現地観測で得られた洗掘データには、

- \* 正会員 国土交通省高知工事事務所前調査課長
- \*\* 国土交通省高知工事事務所 調査課計画第二係長
- \*\*\* 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室長
- \*\*\*\* 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室研究官
- \*\*\*\*\* 正会員 博(工) (株)アイ・エヌ・エー 海岸部
- \*\*\*\*\* 正会員 修(工) (株)アイ・エヌ・エー 海岸部
- \*\*\*\*\* 正会員 Ph.D. (株)アイ・エヌ・エー 海岸部

次に述べるような問題が残されている。

- ①砂面計を用いた現地観測で、面的測定が困難であるため、最大洗掘量を測得し損なっている可能性が高い。
- ②深淺測量による現地観測は高波時に実地することは極めて困難であるため、測量時には洗掘箇所が既に埋め戻されている可能性が高く最大洗掘量の測得が難しい。
- ③模型実験では相似則(フルード則、レイノルズ則)を同時に満たすことが困難であるため、現地と異なる現象を再現している可能性がある。

それゆえ、実務に適用できる洗掘量予測手法を確立するためには、実測データによる検討だけでなく、数値モデルによる検討も必要である。本研究では、過去の論文、報告や被災事例に関するアンケート調査から洗掘量とそれに関わるデータを抽出し、洗掘量に関わるパラメータを把握すると同時に、洗掘現象の再現を目的とした数値モデルにより洗掘量の定量的評価を試みた。

## 2. 既往の実測データによる洗掘量と諸パラメータの関係の検討

本節では、洗掘量  $\Delta h$  と主な諸パラメータ(波浪条件: 換算沖波波高  $H_0$ , 周期  $T$ , 沖波波長  $L_0$ ; 海底条件: 底質中央粒径  $d_{50}$ ; 構造物タイプと設置位置条件: 透過・不透過構造物, 法先水深  $h$ ) との関係を検討した結果について述べる。検討に用いたデータは、市川(1966)、豊島・坂本(1972)、榎木亨・出口(1974)、管原ら(1976)、栗山ら(1987)、榎山・鹿島(1998)、水谷・Mostafa(1998)の模型実験、木原ら(1988)、新井ら(1987)、宇多ら(1989)、徳田ら(1989)、黒岩ら(1990)、荘司ら(1990, 1991)、黒石ら(1990, 1993)の現地観測のほか、根室浜松、島牧、虻田、野々前漁港、温海、久ノ浜、波崎、鹿嶋、大洋、旭真鶴、小田原漁港、桃崎浜、新潟、塩谷、下新川、福井、駿河、静岡、江津、高知、赤江の海岸における離岸堤や突堤などの被災事例を対象にしたアンケート調査から得られたものである。

### (1) 波高と洗掘量の関係

図-1に波高  $H$  と洗掘量  $\Delta h$  の関係を示す。全体的に

データのばらつきが大きい、これは諸実験と観測における波高以外の設置水深等の条件が異なるためと考えられる。水理模型実験データによる相関(図中の+印)では $\Delta h$ が $H$ と同程度まで発達したケースが多い。一方、現地データでは、 $H$ が大きくなるにつれて $\Delta h$ も増大する傾向にあるが、 $H$ に比べて $\Delta h$ が小さ過ぎるケースが多い。この原因は前に述べたように、実測値は最大洗掘量ではなく埋め戻し後の値である可能性が高いためと考えられる。

## (2) 波形勾配と洗掘量の関係

図-2に波形勾配 $H/L_0$ と無次元洗掘量 $\Delta h/H$ の関係を示す。実験データにも現地観測データにも大きなばらつきがあり、 $H/L_0$ と $\Delta h/H$ の明瞭な関係は読みとれない。このばらつきは、諸実験と実測における諸パラメータ(構造物タイプと設置水深、底質等)が異なるためと考えられる。

## (3) 構造物タイプ及び設置水深と洗掘量の関係

図-3に構造物タイプ及び設置水深波高比 $h/H$ と $\Delta h/H$ の関係を示す。なお、図中の直立堤防と防波堤は不透過構造物のみを対象としている。不透過構造物の場合

(黒塗り)に比べて透過構造物である離岸堤等(白抜き)の洗掘量は豊島(1969)が紹介する樁木の実験結果と整合しており、 $1/2$ 程度とみなせる。また、全体的に $h/H=4$ 程度を境にして、 $h/H < 4$ で $\Delta h/H$ が急激に増大し、最大1.5程度までになっている。これは、田中(1974)が言っている、砕波位置付近で最も洗掘が生じ、その値は波高程度になることと整合している。なお、現地観測の洗掘量が水理模型実験値より小さいケースが多いが、この理由として以下が考えられる。水理模型実験で用いる波の殆どは規則波であり、構造物前面で砕波し、不規則波と比較して砕波による乱れが平均的に強い。また、規則波時の部分重複波の影響も不規則波のものより強くなる。さらに、不透過性の強い模型を用いた実験ケースが多く、この場合は現地の構造物よりも顕著に洗掘が発達する。現地データには埋め戻し作用の影響が含まれているが、水理模型実験のデータは時空間的に最大洗掘量である。

## (4) 底質粒径と洗掘量の関係

図-4に中央粒径 $d_{50}$ と $\Delta h/H$ の関係を示す。図-1~3の解説で述べたことと同様な理由からデータのばらつき

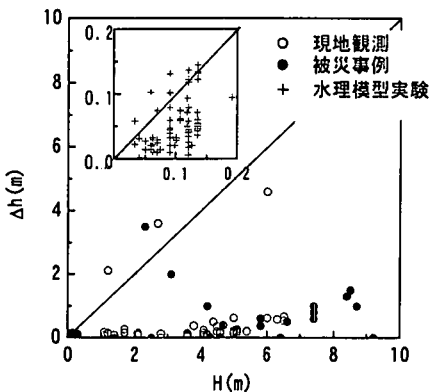


図-1 波高と洗掘量の関係

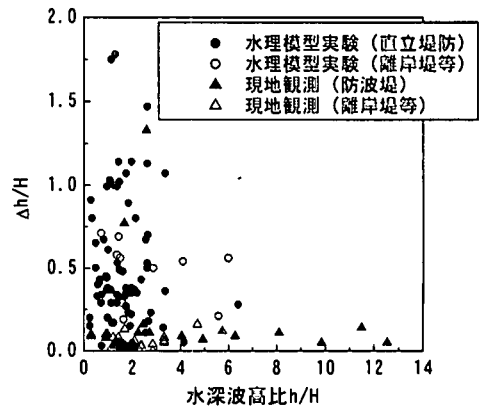


図-3 設置水深波高比と無次元洗掘量の関係

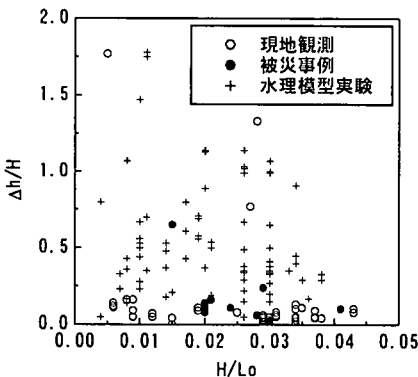


図-2 波形勾配と無次元洗掘量の関係

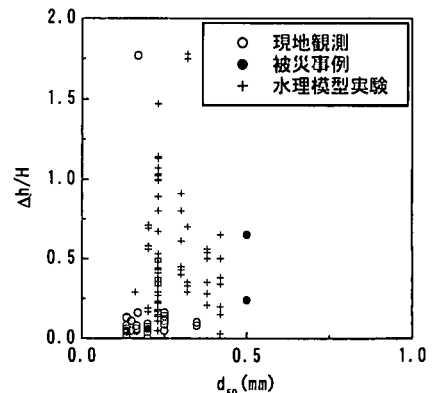


図-4 中央粒径と無次元洗掘量の関係

はかなり大きく、底質粒径と無次元洗掘量との間には有意な関係は認められない。また、粒径が大きくなるほど、洗掘しにくくなるが、埋め戻しも生じにくいことも影響していると考えられる。

### 3. 遡上域も含む海浜地形変化予測モデルによる検討

#### 3.1 数値予測モデルの概要

既往の実測データのみによる検討から洗掘量と諸パラメーターの関係を明らかに示すことが難しく、設計水深を設定する際の洗掘量を決定できるほどの精度を有する情報は得られなかった。それゆえ、次に構造物周辺の洗掘を予測できる数値シミュレーションモデルを開発し、計算データから洗掘量の特性について調べる。

本研究では、Boussinesq モデルと乱流クロージャーモデル ( $k-\epsilon$  モデル) をベースに、波による掃流砂・浮遊砂の輸送をシミュレートできる Vuら (1999, 2000) の鉛直 1 次元モデルを平面二次元に拡張し、洗掘再現の精度を検証する。このモデルの概要を以下に説明する。

波動の基礎式としては、非線型性と分散性を考慮できる Boussinesq の方程式に、砕波による波エネルギーの損失を加味したものをを用いた。遡上域を含めた波の計算をするために、岸側の条件を Hibberd・Peregrine (1979) の方法によって設定した。また、鉛直方向積分した砕波帯内における乱れエネルギーの生成・散逸及び水平方向の輸送を表す乱れエネルギー方程式 ( $k$  式) と乱れエネルギーの散逸率方程式 ( $\epsilon$  式) を解き、砕波による波エネルギーの損失、乱れによる底質の巻き上げ、輸送、沈降を再現できるようにした。

#### 3.2 数値予測モデルの検証

本数値モデルの検証のため、大型造波水路による海浜地形変化の実験 (清水ら, 1980; Larson et al, 1989) について再現計算を試みた。本実験では幅 3.4 m、水深 4.5 m の造波水路に、粒径 0.27 mm の砂で勾配 1/10 の初期地形を造り、波高 1.27 m、周期 7.5 s の規則波を入射させている。図-5 に示す実験開始 4.2 時間後の底面の実験値及び計算値の比較から、本モデルによって砕波帯内の地形変化を精度良く再現できることが分かった。

Summer・Fredsoe (2000) は直立防波堤前面付近の洗掘を調べるために、高さ 0.8 m、幅 0.6 m、長さ 28 m の造波水路を用いた実験を行った。本実験では中央粒径 0.2 mm の砂で一定水深 0.307 m の移動床を作り、直立防波堤を設け、波高 9.7 cm、周期 3 s の波を入射させている。

図-6 に示す実験開始 7 時間後の底面地形変化の実験値及び計算値の比較によると、侵食・堆積位置が一致しており、その絶対値もほぼ一致している。

平面 2 次元地形に対する検証には栗山ら (1987) の実験データを用いた。本実験では縦 7.5 m、横 14.4 m、高さ 0.3 m の平面水槽で、斜め入射重複波による長さ 3.0 m の木製直立防波堤周辺の洗掘を調べた。実験条件は入射波高 5 cm、周期 0.9 s、入射角度  $0^\circ$  及び  $30^\circ$ 、底質中央粒径 0.14 mm、防波堤脚部の初期水深は 0.128 m の水平床である。図-7 は造波開始から 10 時間後の底面高さ分布の計算値を示している。栗山らは堤体に直角方向の断面形状の特徴を明瞭にするため、堤体から等しい距離にある地点の水深を平均し、断面形状の岸沖分布を示した。

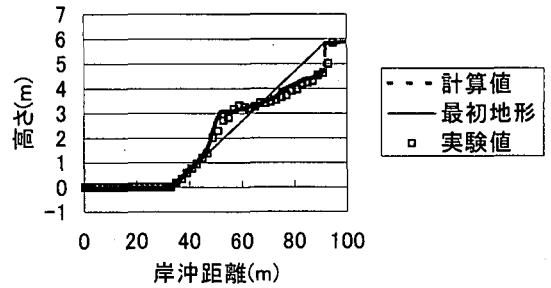


図-5 大型造波水路における実験開始 4.2 時間後の遡上域を含めた地形変化の実験値と計算値

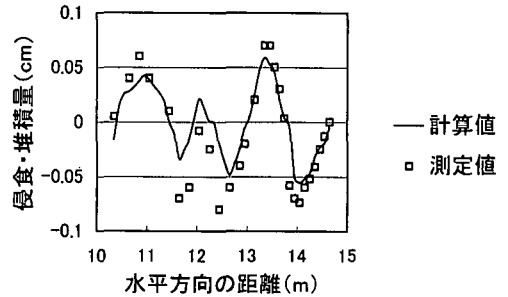


図-6 Summer・Fredsoe の実験底面と計算底面

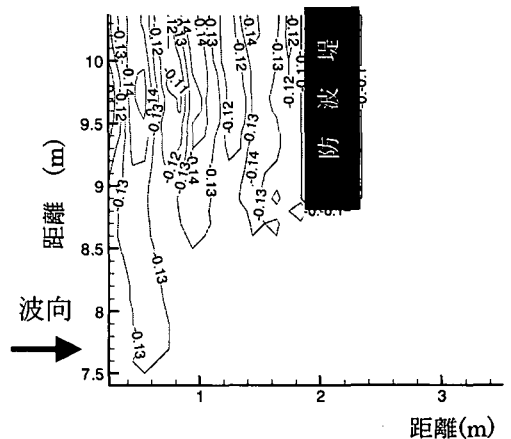


図-7 海底地形の計算値 (入射波向  $0^\circ$ )

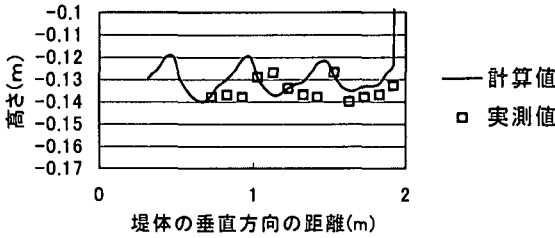


図-8 計算平均断面形状と実験値との比較 (入射波向 0°)

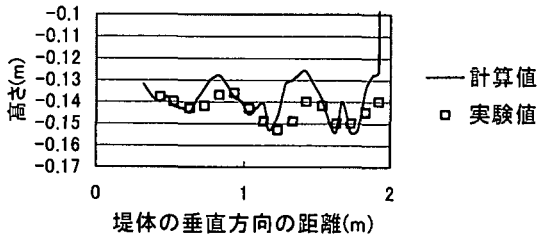


図-9 計算平均断面形状と実験値との比較 (入射波向 30°)

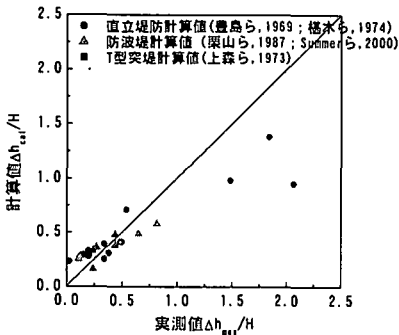


図-10 実測無次元洗掘量と計算無次元洗掘量の相関

図-8及び図-9は計算及び測定の前断面形状の比較を示したものである。これらの図によると堤体前面に形成する重複波場とそれに伴う洗掘・堆積が認められ、計算値と実験値の一致度は良好であることから、本モデルは直立防波堤前面の地形変化を概ね再現できると考えられる。

さらに、本数値モデルを用いて、既往の複数の実験データに対して地形変化の数値計算を行った。実測と計算で得られた無次元洗掘量の関係を示す図-10によると、直立堤防の  $\Delta h/H > 1.0$  の3ケースについては過小評価しているが、それ以外のケースについては良く合っている。なお、波動の計算に関する数値モデルで使用した諸係数はVuら(1999)に準ずるが、掃流砂の輸送計算に必要な底面の波の摩擦係数は実験データを用いたキャリブレーションによって、1.3倍にしている。

本数値モデルの信頼性が確認できたので、次に洗掘量の特徴について数値実験を行った。

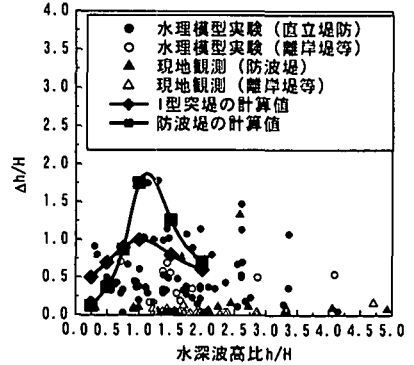


図-11 無次元洗掘量と水深波高比の関係

### 3.3 数値モデルによる洗掘傾向の検討

本数値モデルによる海岸構造物周辺の地形変化計算を行い、洗掘量の特徴を調べた。計算条件としては波形勾配  $H/L_0 = 0.025$ 、I型突堤の場合に入射波向を  $30^\circ$ 、防波堤の場合に入射波向を  $0^\circ$ 、底質の中央粒径は  $d_{50} = 0.2$  mmとし、海底勾配は構造物を置かない場合の底質に対する安定勾配とした。計算開始の1時間後に底面がほぼ定常となるため、1時間後の計算値を最大洗掘量とみなした。図-11は無次元洗掘量  $\Delta h/H$  と水深波高比  $h/H$  の関係を構造物タイプ別に示したものである。なお、図中には実験・観測データを合わせて示してある。I型突堤の場合には堤頭部周辺の最大洗掘量を、離岸堤タイプの場合には前面洗掘量を抽出した。防波堤の計算値と直立堤防の水力模型実験値の一致度は概ね良好である。計算洗掘量は構造物の前面水深が碎波水深付近にあるときにピークを示しているようである。ただし、現地観測値は最大洗掘量を測得している可能性が低く、モデルで用いた諸係数も水力模型実験によって求めたものであるため、現地条件での適用性についてはさらに検討すべきであろう。

## 4. 結論

本研究では既往の実測データによる検討から洗掘量と諸パラメータの関係を検討した。その結果、洗掘量と波高の相関があること、洗掘が碎波帯内で大きくなること、透過構造物の洗掘量は不透過の場合の1/2程度であることなどが確認できた。Boussinesqと乱流クロージャーモデルによる数値予測モデルが水力模型実験による海浜の侵食・堆積、構造物周辺の洗掘傾向を良好に再現できることを確認した。今後は、洗掘予測算定図の整備を目標として、現地のデータを用いて、数値モデルのキャリブレーションを十分に行った上で、傾斜構造物や透過構造物にも適用できるように研究を進める予定である。

## 参 考 文 献

- 新井洋一・田村政太郎・岩本博史・川又良一 (1987): 新潟西海岸における波浪に伴う海底変動, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 357-361.
- 市川 武(1966): 直立防波堤の洗掘災害, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 165-171.
- 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質移動機構に着目した研究—, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
- 宇多高明・中村珠佳・村井慎美・松永博史 (1989): 有脚式離岸堤周りの初期洗掘の現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 409-413.
- 上森千秋・玉井佐一 (1973): 高知県仁井田海岸の浸食防止に関する実験(特にT型突堤の効果について), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 525-529.
- 木原 力・甲斐正義・鳥居雅孝・望月規行 (1988): 防波堤前面の洗掘対策について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 402-406.
- 菅原輝男・長野 章・樋口統三 (1976): 透過式離岸堤の沈下と海浜変形, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 229-233.
- 黒岩正光・林 浩志・野田英明 (1990): 中小漁港の埋没調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 419-423.
- 黒岩正光・野田英明・高橋正治 (1993): 港内堆砂現象に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 501-505.
- 榊山 勉・鹿島遼一 (1998): 消波ブロック被覆工の法先洗掘と波浪条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 886-890.
- 栗山義昭・浅倉弘敏・藤田 誠・入江 功 (1987): 斜め入射重複波による直立堤前面の海底洗掘, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 411-415.
- 佐藤昭二・田中則男・入江 功 (1966): 直立壁堤脚部の波による二次元的洗掘実験, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 156-161.
- 榎木 亨・川崎芳一 (1960): 海岸堤防堤脚部の洗掘について, 京大防災研究所年報, 第4号, pp. 1-12.
- 榎木 亨・出口一郎 (1974): 波による質量輸送速度と堤防前面の海浜変形過程との関係について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 155-159.
- 清水隆夫・斎藤昭三・丸山康樹・長谷川寛・鹿島遼一 (1985): 大型波水路による岸沖漂砂量分布のモデル化. 電中研報告研究報告, 4028, pp. 376-380.
- 荘司喜博・中山春雄・滝口要之助・黒木敬司・坂井隆行 (1990): 新潟西海岸における波, 流れ及び地形変化の観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 429-433.
- 荘司喜博・中山春雄・滝口要之助・高橋豊喜・黒木敬司・坂井隆行 (1991): 新潟西海岸の潜堤設置による波, 流れ及び地形変化の観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 429-433.
- 田中則男 (1974): 砂浜港周辺における海底及び海浜の変化, 昭和49年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1-46.
- 徳田峯夫・田村政太郎・柿崎勉・川又良一・黒木敬司 (1989): 新潟西海岸に新設された突堤周辺の流れと海底変動. 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 439-443.
- 豊島 修 (1969): 現場のための海岸工学, 高潮編, 森北出版株式会社, pp. 238-275.
- 豊島 修・坂本忠彦 (1972): 離岸堤の沈下について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 71-75.
- 水谷法美・Ayman M. Mostafa (1998): 混成堤および潜堤の基礎地盤の波浪応答と局所洗掘に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 881-885.
- 沼田 淳・和田 信 (1973): 護岸前面海底地形の変化に関する一実験, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 495-499.
- Vu T. C.・谷本勝利・山本吉道 (1999): 海浜断面における波動・地形変化の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 611-615.
- Vu T. C.・谷本勝利・山本吉道 (2000):  $k-\epsilon$  モデルによる碎波の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 176-180.
- Larson, M., N. C. Kraus and M. R. Byrnes (1989): SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 2. Tech. Report CERC-89-9.
- Summer B. M., J. Fredsoe (2000): Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater. Coastal Engineering, 40, pp. 59-87.