

鉛直循環流誘起型護岸前面における鉛直循環流の 発生機構と構造特性に関する研究

小田 一紀* ・重松 孝昌** ・池田 憲造***
松永 英郎**** ・清水 治生***** ・藤田 孝*****

1. はじめに

閉鎖性内湾の沿岸域は、夏季には表層水温の上昇と河川からの淡水流入とが相まって顕著な密度成層が発達する。このため、海水の鉛直混合が妨げられるとともに、枯死・沈澱した植物プランクトンなどの有機懸濁物を分解するバクテリアによって多量の酸素が消費され、底層には広範囲にわたって生物生息不可能な貧酸素水塊が形成され、これが内湾生態系の劣化をもたらす大きな原因の一つとなっている。本研究では、護岸の前面に波浪誘起流を発生させ、酸素豊富な表層水を底層に供給し、前述のような底層における貧酸素構造を改善するために考案した護岸堤体の水理模型実験と補足的な数値波動解析によってその鉛直循環流の発生機構と構造特性を解明する。

2. 水理模型実験の概要

(1) 実験方法

水理模型実験は、吸収式造波装置を備えた長さ 50 m, 幅 1.0 m, 深さ 1.5 m の 2 次元造波水槽を用いて行った。幾何学的縮尺は 1/10 とした。堤体模型を造波板から約 37 m の位置に設置し、造波開始後、鉛直循環流が十分に発達し、定常になったことを確認した後、堤体模型前面の流速分布を十分に細かいメッシュ間隔で 2 成分電磁流速計 2 台を用いて測定した。各点における測定時間は短くて 10 周期間、長くて 60 周期間である。流速データは AD 変換装置を用いてコンピュータに取り込み、時間平均流速のベクトル分布図を求め、鉛直循環流の構造解明に供した。容量式波高計 2 台を沖側の適切な位置に設置し、入反射分離法で波の反射率を測定した。また、色素投入によって循環流の発生を目視や写真撮影によって確認した。

(2) 堤体模型

実験では 4 種類の堤体模型を用いた。何れの模型もア

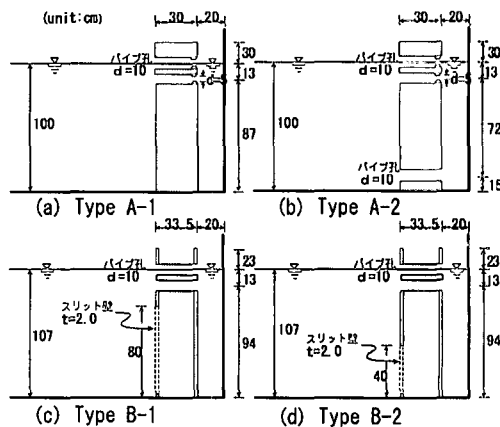


図-1 堤体模型の鉛直断面構造と寸法

クリル材を用いて製作した。それぞれの構造と寸法は図-1(a)～(d)に示すとおりである。これらの堤体模型は、何れも堤体断面の岸側に遊水室(幅 20 cm)が設けられている点は共通しているが、堤体の沖側断面部に水平パイプ孔(何れも内径 10 cm)だけがある構造(タイプ A)と、上方の水平パイプ孔と下方の鉛直スリット壁との組み合わせ構造になっている場合(タイプ B)とに大別される。さらに、タイプ A は、上方のみに 2 本のパイプ孔を設けた場合(タイプ A-1)と下方にもパイプ孔を 1 本設けた場合(タイプ A-2)とに分けられる。

また、タイプ B は、下方の鉛直壁(厚さ 3.0 cm)の全高にわたってスリットが開いている場合(タイプ B-1)とスリットの上半分が閉まっている場合(タイプ B-2)に分けられる。タイプ B は鉛直循環流誘起機能だけでなく、より高い消波機能も備えることを期待して考案された。

タイプ A の上方 2 本のパイプ孔には、その岸側端部にベンチュリー部(狭窄部の内径は 5 cm)が設けられているが、タイプ A-2 の下方のパイプ孔およびタイプ B の上方 2 本のパイプ孔にはベンチュリー部は設けられていない。また、タイプ B のスリット壁背後の空間は遊水室になっており、スリットから入った波は遊水室内で上下に自由に動きうる構造になっている。したがって、タイプ B ではスリット用とパイプ用の遊水室が別々に 2 つ存在

* 正会員 工 博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科
** 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科
*** 学生会員 大阪市立大学工学研究科
**** 正会員 (株)クボタ鉄管研究部
***** 正会員 工 修 日立造船(株)技術本部技術研究部

している。

なお、タイプ A、タイプ B とも正面から見た横方向のパイプの配置は、水槽側壁を鏡面と見なしたときに鏡像パイプ孔列が等間隔配置になるように、その中心間隔を水槽幅の $1/3$ (33.3 cm) に設定した。また、タイプ B のスリットの開口幅は 2.1 cm、奥行きは 3.0 cm、スリット間隔は 7.1 cm である。

3. 実験結果と考察

(1) 鉛直循環流の発生機構

図-2 は、本堤体の鉛直循環流誘起機能上の代表的な対象波である周期 $T=1.25$ s、波高 $H=5.0$ cm (現地換算 $T=4.0$ s, $H=0.5$ m) の入射波に対してタイプ A-1 堤体前面に形成された時間平均流 (鉛直循環流) の流速ベクトル分布である。この図によれば、堤体上方のパイプ孔から沖側に流出した噴流が堤体前面水域の上層 (水深の約 $1/3$ 程度の厚さ) に冲向きの流れを形成し、これを補うように沖側から堤体に向う補償流が下層に発生している。この補償流は堤体直近で上昇流となり、図には示されていないが、その一部はパイプ孔に取込まれて再び噴流として沖側に流出し、全体として鉛直循環流を形成する。他のタイプの堤体についても後の図で分るように、その構造や入射波条件の違いによって循環流の規模や堤体直近における局所構造に多少の違いは見られても、基本的には図-2 と同様な速度ベクトル分布を示す。

次に、この循環流を発生させる *driving force* は何かということを考えてみよう。既に筆者は、水面にパイプ孔を有する透過堤の水理特性に関する一連の研究 (小田ら, 1990, 1995, 1996) を行った。その過程で本透過堤が比較的小さな波に対しても港内への高い導水機能を有することを見出し、その機構が、堤体壁面での部分重複波の水面上昇によりパイプ孔に段波が発生し、これが港内側へ質量輸送をもたらすことによることを示した。

今回提案した堤体は透過構造ではないが、パイプ孔に段波が発生し質量輸送をもたらす点では透過堤の場合と本質的な違いはない。今回の不透過堤体では、パイプ孔に発生した段波は堤体断面の岸側遊水室に進入して遊水室内の水位上昇をもたらす、再びパイプ孔を段波あるい

は開水路流れとなって沖側に向い、波面下降時に潜り噴流ないしは自由落下水となって堤体から流出する。このパイプ孔からの流出水が今回の鉛直循環流の *driving force* となっているといえる。このように、水面付近に設けられたパイプ孔は波エネルギーを流れエネルギーに変換し、波の進行方向あるいはこれと反対方向 (沖側) に水を輸送する機能を持ち、波・パイプ系があたかもポンプのような働きをすることが分る。既に、筆者らの研究の時期よりかなり以前に Bruun・Viggosson (1973, 1977) はこの働きを *wave pump* と称し、外海水をマリーナの泊地に送水し、水質浄化に役立てる研究を行っている。今から考えれば、自然エネルギーを利用した海域環境改善技術の先駆的な研究だといえる。

さて、本堤体前面に形成される鉛直循環流の *driving force* を理解したところで、鉛直循環流の発生機構を考えてみよう。堤体上方のパイプ孔から潜り状態ないし自由落下で流出した噴流が堤体前面水域の上層 (厚さは水深の約 $1/3$ 程度) を沖に向って流れ、これを補うように堤体に向う補償流が下層に形成される。上層の冲向き流れは乱流拡散によって沖に行くにしたがって幅が拡がるとともに、乱れによるエネルギー消散とも重なって漸次流速が減少していく。これに対して下層の補償流は、鉛直断面内で上層の冲向き流れとの連続条件を満たすように沖側から流速を増大させながら堤体に向って流れる。堤体直近では堤体に阻まれ急速に水平流速を減じると同時に、上向き鉛直流速が増しパイプ孔から流出する噴流の鉛直流速成分との連続条件を満たすようにバランスする。以上が堤体前面に鉛直循環流が発生する機構である。

(2) 鉛直循環流の構造特性

a) 波浪特性依存性

次に、本堤体前面に形成される鉛直循環流の構造特性が波浪特性によってどのように変化するかを、タイプ A-1 堤体の場合を代表例として述べてみよう。

図-3(a)~(c) は、入射波の波高を $H=5$ cm と一定に保ち、周期をそれぞれ $T=1.25$ 、1.60、および 1.90 s に変えたときのタイプ A-1 堤体の前面水域に形成された時間平均流の流速ベクトル分布を表している。これらの実験結果によれば、周期の一番短い $T=1.25$ s の場合に冲向きの上層流が一番遠くまで流れており、またこれに対応して岸向きの下層の補償流も一番遠くから流れてくることが明瞭に現れている。周期が $T=1.60$ s や 1.90 s になると循環流の強さ (流速) は部分的に $T=1.25$ s の場合より強くなるどころが見られるが、循環流の形成される範囲は明らかに $T=1.25$ s の場合より狭くなっている。このように、波高が同じであれば、周期が短い波ほど循環流の形成される範囲は広くなるが、循環流の強さは周期が長い波ほど強くなる傾向が見られる。実験で

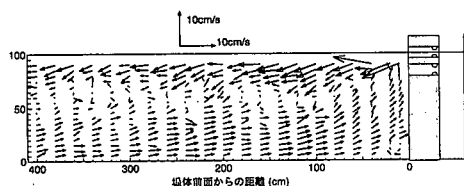


図-2 鉛直循環流の基本的な構造
(タイプ A-1 堤体; $T=1.25$ s, $H=5.0$ cm)

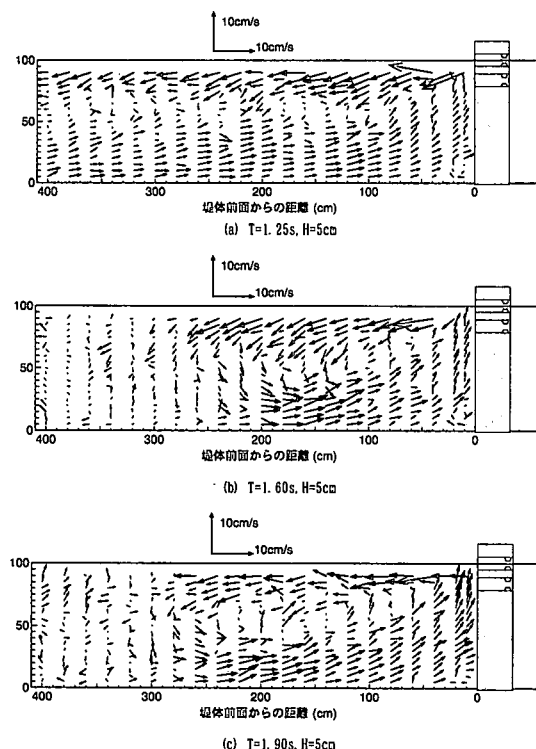


図-3 鉛直循環流の構造と強さの波周期による相違
(タイプ A-1 堤体; $H=5\text{ cm}$)

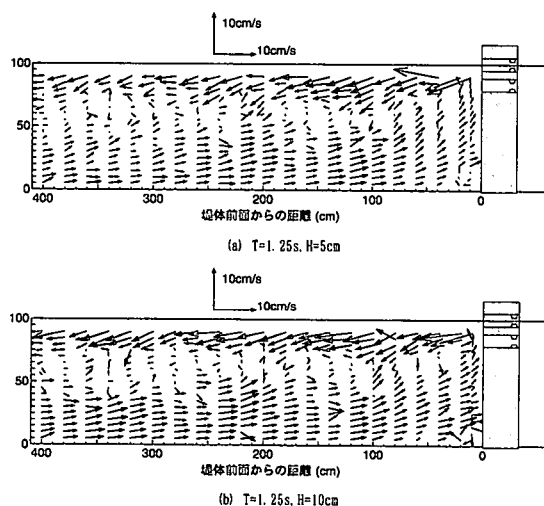


図-4 鉛直循環流の構造と強さの波高による相違
(タイプ A-1 堤体; $T=1.25\text{ s}$)

の観察によれば、周期が長いほど堤体壁面での波面上昇時にパイプ孔を通して遊水室に流入する水の総量が大きく、遊水室の水位上昇も大きくなる。そして、その後の波面下降時にパイプ孔を通して沖側に流出するときの瞬間的な噴流の流量（運動量）が大きく、且つ、堤体前方

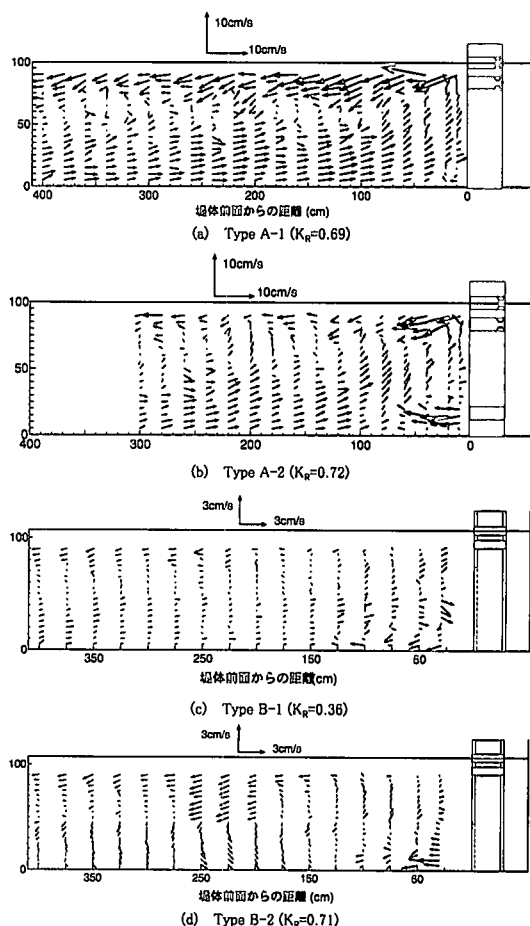


図-5 堤体構造による鉛直循環流の相違
($T=1.25\text{ s}$, $H=5.0\text{ cm}$)

の水面に突入する時の流速の鉛直成分も相対的に大きくなるので、より深い位置まで噴流の運動量が輸送される。このことが周期が長くなると循環流の形成される範囲が相対的に狭くなり、逆に強さは大きくなる原因ではないかと考えられる。

一方、同一周期波でも波高が変わると循環流はどのように変わるのであろうか。図-4(a)～(b)は、 $T=1.25\text{ s}$ で波高が $H=5.0\text{ cm}$ と 10.0 cm の場合について時間平均流の流速ベクトル分布を比較した図である。循環流の構造や範囲に大きな差は見られないが、流速は $H=10.0\text{ cm}$ の場合の方が全体に 10～30% 大きくなっていることが認められるが、 $H=5.0\text{ cm}$ のときの 2 倍にはなっていない。これは、波高がある大きさ以上になるとパイプ孔入口の上端よりかなり上に波面が上昇するのでパイプ孔内の流体運動は段波でなくなり、流量が頭打になることによると考えられる。

b) 堤体構造の影響

では、このような鉛直循環流の構造や強さは、堤体の構造を変えることによってどのように変るのであろうか。今回、堤体の構造は図-1に示した4種類であるが、 $T=1.25$ s, $H=5.0$ cmの同一入射波条件でそれぞれの堤体前面に形成される時間平均流の流速ベクトル分布を比較して表したものが図-5(a)~(d)である。なお、図のタイトル中のKrは反射率を表す。これらの図より以下のことが分る：①タイプAとタイプBとでは、循環流の強さに大きな差が見られる。②タイプAでも下方にパイプ孔を設けたタイプA-2の方が循環流の強さが減少する。③タイプBでも、スリットの上半分が閉まっているタイプB-2の方がやや流速が大きい。④以上をまとめれば、本研究で用いた鉛直護岸構造では、消波機能と循環流誘起機能とは互いに背反関係にあると見られる。

4. 数値波動水槽による数値解析

連続の方程式とレイノルズの運動量方程式を支配方程式とし、これに k - ϵ 乱流モデルとHirts & Nichols提案の水面決定法(VOF法)を併用した2次元数値波動解析法(Lin & Liu, 1998)を用いて堤体前面に形成される鉛直循環流の構造を数値解析した。計算の対象とした堤体断面の形状と寸法は図-6に示すように、タイプA₀-1とタイプA₀-2の2種類である。両者は、それぞれ模型実験で用いたタイプA-1およびタイプA-2を想定しているが、ここでの解析は2次元解析であるから模型実験で用いたパイプ孔列の構造とは異なり、パイプ孔の内径と同寸法の開口高さをもつ横スリット構造になっている点に注意する必要がある。

(1) 鉛直循環流の構造

図-7(a)~(d)は、タイプA₀-1堤体に対して $T=1.60$ s, $H=10.0$ cmの入射波を与えたときの、計算開始から $20T$ (T :波周期)毎の時間平均流の流速ベクトル分布を表す。時間平均流速場は計算経過時間とともに発達し、鉛直循環流の形成される範囲は $40T$ 経過する頃に最大になるが、その後やや縮小、後退し、 $80T$ 経過する頃にほぼ定常になる。図-3(b)に示したタイプA-1堤体に対する流速ベクトル分布の実験結果と比較するには断面形状も入射波の波高も異なるので直接の比較はできないが、堤体前面に循環流が形成され、その規模や強さの空間分布などの傾向は実験結果に類似しているといえる。なお、下方に横スリットのあるタイプA₀-2堤体に対する計算結果はA₀-1とほとんど差が見られなかったもので、ここでは掲載を省略した。

(2) 乱れ強度分布

図-8(a)~(d)は図-7(a)~(d)に対応した計算経過時間毎の乱れ強度($u^2 + w^2$)^{1/2}の空間分布である。乱れ強度の経時変化は図-7の流速ベクトル分布のそれとは異

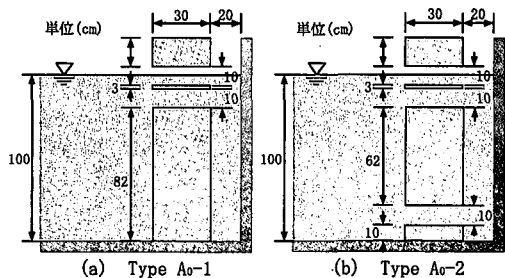


図-6 数値計算における2次元堤体断面の形状と寸法

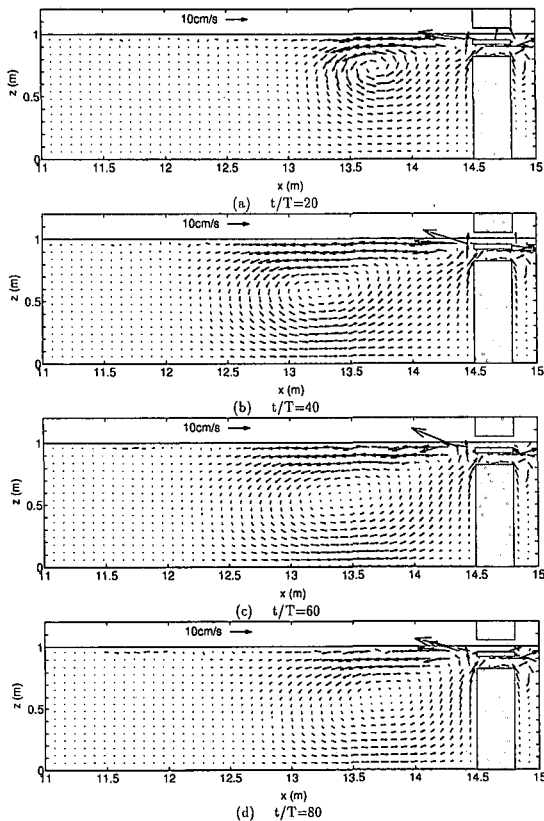
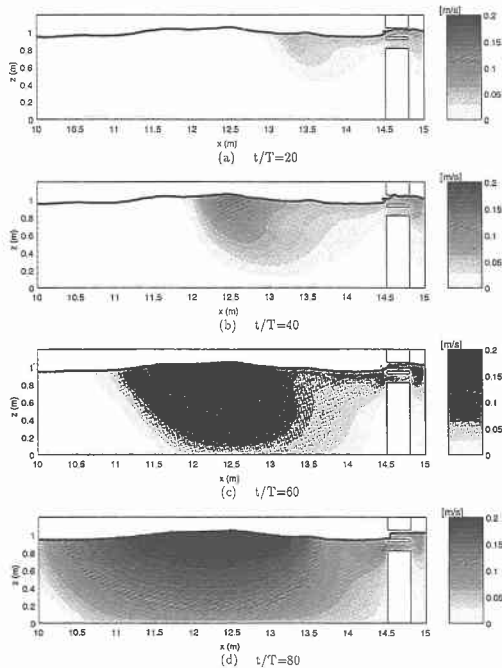


図-7 数値計算による鉛直循環流の発達過程

なって、時間経過とともに乱れ強度の強い範囲はより幅広く、より沖合まで広がることを示している。これは、堤体の水面近傍にある横スリットからの戻り流れが堤体前方の水面に突入するときにより大きな乱れを発生させ、それによる乱れエネルギーが鉛直循環流による移流と乱流拡散によって沖に向かって広範囲に広がるためであると考えられる。このことは、戻り流れが水面に突入するときに多量の酸素取込みが行われるので、水中に取込まれた溶存酸素がこの堤体の循環流発生機能と攪拌機能によってその前面水域の水底にまで、且つかなり沖合まで広範囲に輸送される可能性を示しているといえる。



図一 数値計算による乱れ強度の発達過程
(タイプ A₀-1 堤体; $T=1.60$ s, $H=10.0$ cm)

5. 結 論

本研究によって以下のことが明らかになった。

(1) 本研究で提案した、堤体後部に遊水室を有し、これと沖側水面をパイプ孔で連結する構造の護岸堤体は、その前面水域の広い範囲にわたって鉛直循環流を発生させ、水質環境・生態系環境の改善に役立つことが期待される。その流れの基本構造は、上層で冲向き、下層は岸向きである。

(2) この循環流の形成される範囲は入射波の周期が短いほど広いが、逆にその強さは周期が長いほど強くなる傾向が見られた。また、一般に波高が大きいほどその

強さは強くなるが、線形的には増大しない。

(3) 今回の実験の範囲内では、消波機能を高めたタイプ B は消波機能の低いタイプ A より循環流誘起機能は低下した。従って、この種の鉛直護岸では消波機能と循環流誘起機能とは互いに背反関係にあり、両機能がバランスする最適構造を選択する必要がある。

(4) $k-\epsilon$ 乱流モデルと VOF 法を併用した 2 次元数値波動解析法によってタイプ A に類似した 2 次元構造の護岸堤体前面の流体運動解析を行い、実験で得られた鉛直循環流を定性的に再現することができた。また、乱れ強度分布の計算結果から、水面付近で取込まれた酸素がこの種の堤体の循環流発生機能と攪拌機能によって水底から沖合までのかなり広範囲にまで輸送される可能性があることが示唆された。

なお、以上は単一密度流体場で見出された知見である。海域のような密度成層場においても基本的には今回のような鉛直循環流が発生するものと考えられるが、その構造や規模についてはさらに研究を行う必要がある。

参 考 文 献

- 小田一紀・天野健次・大東秀光・鈴木 隆・田中彬夫 (1990): パイプ式透過堤の水理特性および曝気特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 559-563.
- 小田一紀・真栄原宣之・中西昭人・田中彬夫 (1995): 波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1116-1120.
- 小田一紀・真栄原宣之・山上雅実・田中彬夫 (1996): 水面にパイプ孔を有する透過堤の波浪誘起導水量に関する理論的解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1231-1235.
- Bruun, P. and G. Viggosson (1973): The wave pump application in pollution control, Proc. 2nd Conf. on Port and Ocean Engrg. under Arctic Conditions, Univ. of Iceland, Reykjavik, Iceland, pp. 397-409.
- Bruun, P. and G. Viggosson (1977): The wave pump: Conversion of wave energy to current energy, Jour. of The Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, pp. 449-469.
- Lin, P. and Liu, P. L.-F. (1998): "A numerical study of breaking waves in the surf zone", J. Fluid Mech., 359, pp. 239-264.