

潜水構造物による碎波再生過程と碎波持続距離に関する研究

岩田好一朗*・川崎浩司**・安藤敏宏***

1. 緒 言

潜水構造物による強制碎波によって生じる乱れの卓越している領域では、水塊の鉛直混合や水中への気泡の混入・連行に伴うエアレーション効果が促進されるため、水生生物に適した環境になりうる。さらに、最近集魚効果の1つとして発声音説が注目されているが、渦や碎波によって水中で生じる高周波数成分の圧力変動が音の発生メカニズムの一要因であることも踏まえて考えると、碎波持続領域の内部特性を把握することは、波の制御のみならず、よりよい海域生態環境の創造のためにも必要不可欠である。今まで、碎波持続距離の特性については若干検討されているものの(中村ら, 1966; 岩田ら, 1996a, 1996b), 碎波持続領域内の内部機構に関しては不明のところが多く、多くの検討の余地が残されている。

そこで、本研究では、まず詳細な水理実験を行い、2次元波動場に設置された潜水構造物による碎波持続距離を入射波特性と構造物の幾何スケールと関連づけて明らかにするとともに、碎波持続領域内の水中および空中の圧力変動特性についても考究する。さらに、SOLA-VOF法(Hirt and Nichols, 1981)を用いて潜水構造物による碎波変形と再生過程の数値計算を行い、碎波後の波の挙動特性および内部機構について議論する。

2. 水理実験と解析方法

名古屋大学の2次元造波水槽(長さ25 m, 幅0.7 m, 高さ0.9 m)を用いて、一定水深($h=40$ cm)に設置された不透過矩形型潜水構造物に対し、I) 碎波持続距離、II) 碎波に伴う水中および空中の圧力変動特性を明らかにする2つの水理実験を行った(それぞれ実験I, IIと呼ぶことにする)。

実験Iでは、構造物周辺における波の挙動を8 mmビデオカメラで撮影して、30コマ/秒ごとの静止画像から、碎波形式、碎波位置、碎波持続距離などを読みとった。構造物の幾何スケールは、無次元堤幅 B/L_i を0.05~1.0

の範囲で6~9種類、無次元潜水深 R/h を0.2, 0.4, 0.6の3種類とした(B, L_i, R はそれぞれ堤幅, 入射波長, 潜水深)。また、作用波はすべて規則波であり、周期 T を0.8, 1.2, 1.68 sの3種類、入射波高 H_i を2.0 cm~16 cmの範囲で1.0 cmごとに变化させ、碎波する場合のみ画像解析に用いた。

実験IIでは、Spilling-Plunging型碎波(S-P型碎波)と片野ら(1992)が観察した二段碎波の2つの碎波形式による差異について検討するために、構造物の大きさを $B/L_i=0.2$, $R/h=0.2$, 入射波の周期を1.2 sと固定し、入射波高のみを6.0, 8.6 cmと2種類变化させた。構造物沖側から岸側にわたる約400 cm間の圧力の時間変動を、静水面から鉛直下向きに8 cmの水中および上向きに10 cmの空中の2地点で、超小型マイクロホン(Brüel & Kjær社製: 8103)を用いて計測し、その出力をチャージ増幅器(Brüel & Kjær社製: 2635)を通してデータレコーダーに記録した。また、潜水構造物周辺の水位変動特性を把握するために、同実験条件のもとで、水位の時間変動を電気容量式波高計(計測技研: C-300, C-500)を用いて100地点計測した。

3. SOLA-VOF法による数値解析

本研究では、碎波のように自由水面が多価関数となる複雑な形状に対しても簡易かつ高精度に計算することができるSOLA-VOF法を採用して、潜水構造物による碎波再生過程の数値計算を行った。本計算手法で用いた基礎方程式は、非圧縮性粘性流体の場合の連続方程式、Navier-Stokes運動方程式、そして自由水面を模擬するために必要となる、流体の体積率を表すVOF関数の移流方程式の3つから構成される。なお、本計算手法の詳細については、岩田ら(1995)が行った手法とほぼ同様である。計算領域は、水平 x 方向、鉛直 z 方向に対して、それぞれ $5L_i, 1.5h$ であり、計算格子の大きさを、各方向に対して $\Delta x/L_i=1/100$, $\Delta z/h=1/20$ ($\Delta x, \Delta z$ はそれぞれ x, z 方向の計算格子の長さ)とした。また、時間ステップ間隔 Δt は、Courant安定条件から、 $1/1000$ sと一定にした。

計算結果の解析方法として、0.02 sごとに出力した水

* フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学教室
 ** 学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻
 *** 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

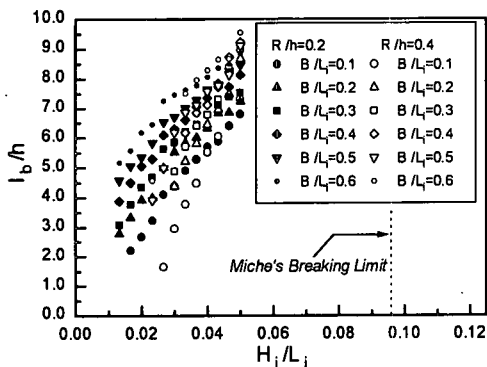
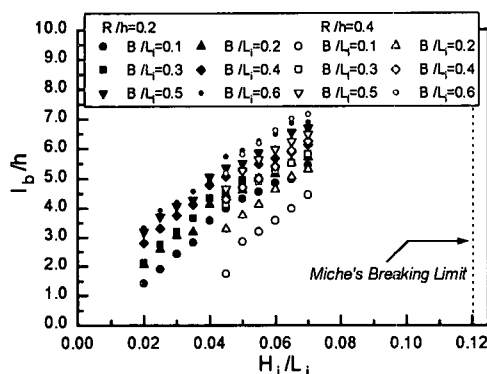
(a) $h/L_i = 0.13$ (b) $h/L_i = 0.2$

図-1 波形勾配と碎波持続距離の関係

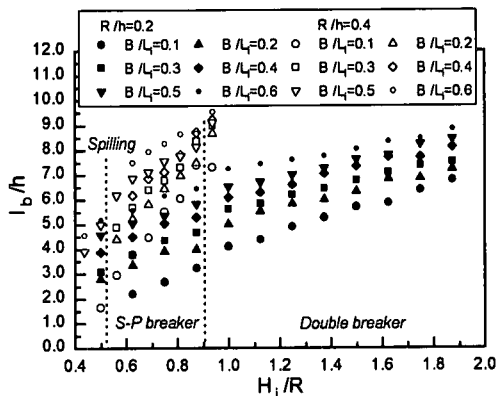
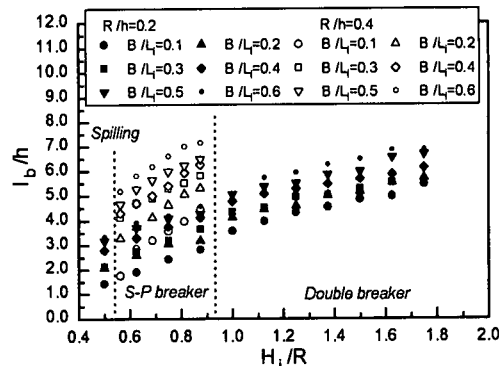
(a) $h/L_i = 0.13$ (b) $h/L_i = 0.2$

図-2 相対波高と碎波持続距離の関係

位変動の計算値から、高速フーリエ変換を用いてスペクトル解析を行った。

4. 碎波持続距離の特性

碎波持続距離を碎波点から気泡連行がなく乱れが認められない地点までの距離と定義し、入射波と構造物の幾何スケールと関連づけながらその特性を検討する。

図-1は、入射波の波形勾配 H_i/L_i と無次元碎波持続距離 l_b/h の関係を、構造物の幾何スケール比を表すパラメータ R/h および B/L_i と関連づけたものであり、図中の点線は、Miche (1944) が提案した一定水深での進行波の碎波限界を表す。両図に示すように、 R/h と B/L_i に関係なく、 H_i/L_i の増大に伴い、無次元碎波持続距離 l_b/h が大きくなる。また、構造物が潜っているため、 $h/L_i = 0.13$ の場合より、水深波長比が大きい $h/L_i = 0.2$ の場合のほうが構造物の影響を受けにくくなるため、同じ H_i/L_i に対して l_b/h が減少していることが確認できる。ついで、構造物の幾何スケール比の違いについて検討すると、 R/h が一定の場合 B/L_i が増大するにつれて l_b/h も大きくなっている。この理由として考えられるのは、 B/L_i が

大きいほど構造物天端上の浅い水深の領域が長くなり、碎波による乱れおよび気泡が継続しやすいと推測される。

R/h の影響については、潜水深が深い $R/h = 0.4$ の場合のほうが、概略碎波持続距離が短くなっているが、同じ H_i/L_i に対しても R/h の違いによって碎波形式が大きく異なるため、碎波形式と関連づけて検討する必要がある。岩田ら (1996) は、碎波形式が相対波高 H_i/R 、水深波長比 h/L_i 、無次元堤幅 B/L_i の3つにより概ね支配され、また $B/L_i \geq 0.5$ の条件下では、碎波形式の区分は B/L_i に依存しなくなることを指摘している。そこで、碎波形式と碎波持続距離の関係を示したのが図-2であり、図中の碎波形式の区分は $B/L_i \geq 0.5$ の場合である。 H_i/R が大きくなるにつれて、Spilling 型碎波、S-P 型碎波、そして二段碎波へと変化し、碎波による水平渦、splash および乱れの規模が増大するため（画像解析から確認している）、無次元碎波持続距離 l_b/h は大きくなる。また、 l_b/h は、碎波形式が同じ場合、例えば図-2(a) をみると、 $0.52 \leq H_i/R < 0.9$ においては R/h に関係なく S-P 型碎波の

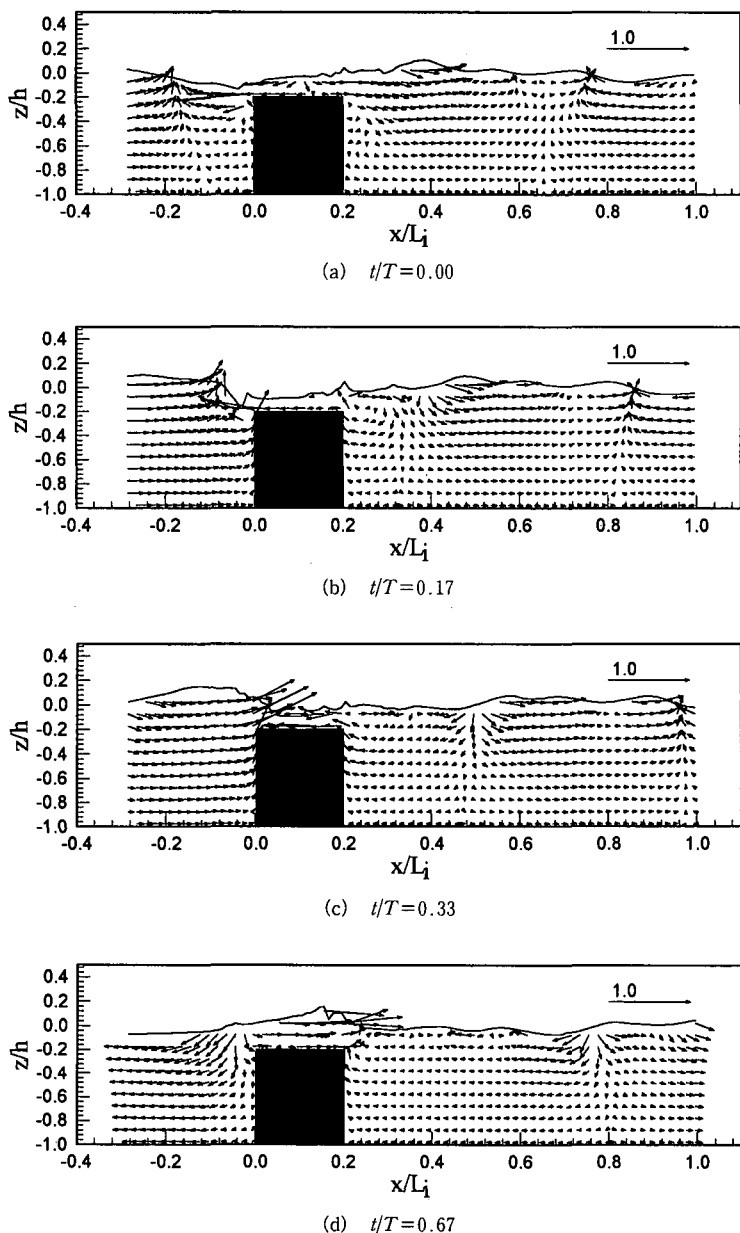


図-3 二段碎波の計算結果の一例

場合で、 R/h が0.2よりも0.4の場合のほうが大きくなっているのが認められる。この理由として、 R/h が小さい場合に比べて R/h が大きい場合、波の反射が小さく波の透過が大きくなり、その分碎波による乱れが大きくなり、碎波持続距離が長くなったものと予想される。

5. 潜水構造物による碎波再生過程

前節では、碎波持続領域の特性の1つである碎波持続距離に着目して議論を進めてきた。この節では、SOLA-VOF法による潜水構造物による碎波変形と再生過程の

計算結果から、碎波持続領域の内部構造について考察する。

図-3は、構造物周辺における水位と流速の時間変化の計算結果の一例を示したもので、二段碎波の場合である。なお、図中の流速値は $\sqrt{gR}$ (g :重力加速度)で無次元化している。図-3(a), (b)より、構造物天端上から構造物沖側前面に向かう戻り流れと構造物前面に進行してきた波が衝突し、その周辺の流速場が激しく乱されると同時に、構造物前面で波面が不連続となり碎波している様子がわかる。さらに、戻り流れとの衝突により構造物前面で盛り上がった波が、構造物上で再び崩れていく様子が、図-3(b)~(d)から認められ、二段碎波の碎波過程の特徴が明瞭に確認できる。また、図-3(b)から構造物岸側の隅角部周辺において、碎波の影響により、大規模な渦の発生が認められる。

ついで、波の再生過程について検討する。構造物岸側背後では、構造物上で急変する水深の影響による波と構造物の非線形干渉および強制碎波により、高次の周波数成分波が発生するとともに波の分裂が確認できる。また、二段碎波の場合は、S-P型碎波に比べて構造物の岸側背後で岸向きの流れが強く生じているため、再生した波のみかけの波速が速くなることが認められた。計算結果は実験結果を精度よく再現できることを検証しているが、本計算手法では連行気泡および乱れを考慮しておらず、これらを考慮した新たな計算手法の開発が必要である。

つぎに、水面変動の振幅スペクトルの変化および各周波数の振幅スペクトルと碎波持続領域の関係について検討する。図-4(a), (b)は、それぞれS-P型碎波、二段碎波の場合の、計算結果から得られた無次元振幅スペクトル $2A(f)/H_i$ ($A(f)$:周波数 f に対する振幅スペクトル)の空間分布を示したもので、図中のB.P., B.E.P.はそれぞれ碎波点、碎波終了点を表す。両図より、構造物沖側では基本周波数の振幅スペクトルが $L_i/4$ 周期ごとに変動しており、入射波と構造物からの反射波によって部

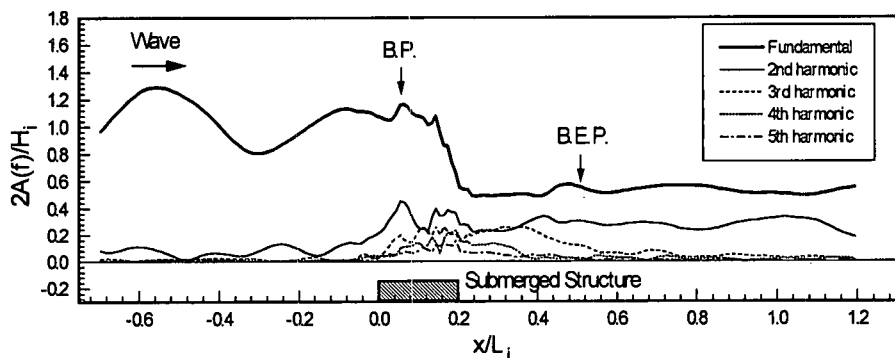
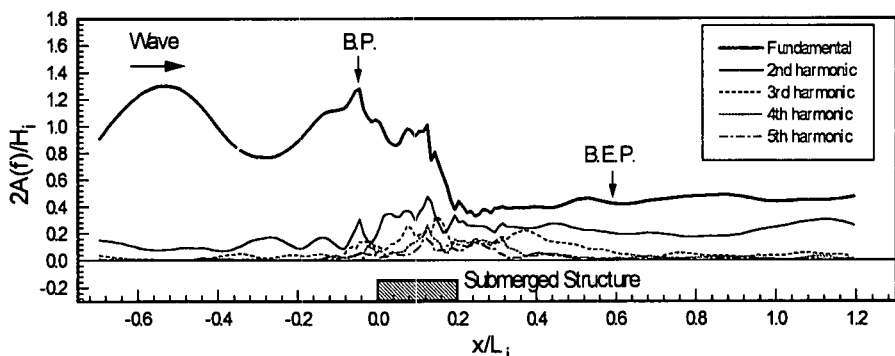
(a) S-P 型砕波 ($H_i/L_i=0.03$, $h/L_i=B/L_i=R/h=0.2$)(b) 二段砕波 ($H_i/L_i=0.043$, $h/L_i=B/L_i=R/h=0.2$)

図-4 自由水面変動に対するスペクトル解析 (数値計算)

分重複波が生じている様子が確認できる。構造物前から岸側方向への基本周波数の挙動特性についてみると、S-P 型砕波の場合は構造物上で、二段砕波の場合は構造物前面で増大し砕波点から急激に減少し、それ以降の岸側ではほぼ一定の値となっている。また、二段砕波のほう砕波後の基本周波数成分の減少率が大きく、砕波規模が大きいたことがわかる。さらに、構造物沖側の水深急変部付近では、構造物と波の非線形干渉から2次以上の高周波成分が増大している。しかし、構造物から離れるにつれて3次以上の高周波数成分は減衰していくが、2次の周波数成分はそれほど減少していない。ここでは、水位変動のデータを用いてフーリエ変換を行い周波数成分別に波を分離しているため、自由波と拘束波を区別することができないが、構造物の岸側の波の再生領域において基本周波数成分と2倍周波数成分の増減が逆になって変動していることから、波と構造物の非線形干渉および砕波の影響より、新たに2倍周波数の自由波が形成されているものと思われる。水理実験による砕波終了点B.E.P.は、S-P型砕波と二段砕波の場合、それぞれ $x/L_i=0.5, 0.605$ の地点であり、図-4に示す、4, 5倍周波数成分が構造物背後で減少するあたりとほぼ一致して

いることが認められる。また、本論では図示していないが、水理実験で得られた $2A(f)/H_i$ は、ほぼ数値計算の値と一致することを確認している。

6. 砕波に伴う圧力変動特性

ここでは、砕波持続領域の内部特性を波動音の発生機構と関連性が高い圧力変動の面から考察する。水中圧力の時間変動と圧力スペクトル分布を同時に示した図-5をみると、非砕波および波の再生領域(図-5(c))では圧力の高周波数成分が顕著に認められないものの、砕波が持続している領域(図-5(a), (b))で、20~200 Hzの高周波数成分が卓越しており、砕波により波動音が発生している可能性が高いことがわかる。なお、構造物がない場合の圧力変動の計測により、200 Hz以上の高周波数成分については造波装置や岸側に設置されている消波装置から発生する音を含むノイズとみなしてよく、ノイズによる圧力変動の値は0.1 Pa以下である。

水中圧力の時間変動についてみると、砕波継続領域において、高周波数成分の発生は主に波の峰の位相で確認できる。ここでは図示していないが、S-P型砕波の場合も同様な傾向が得られた。しかし、図-5(a)に示すよう

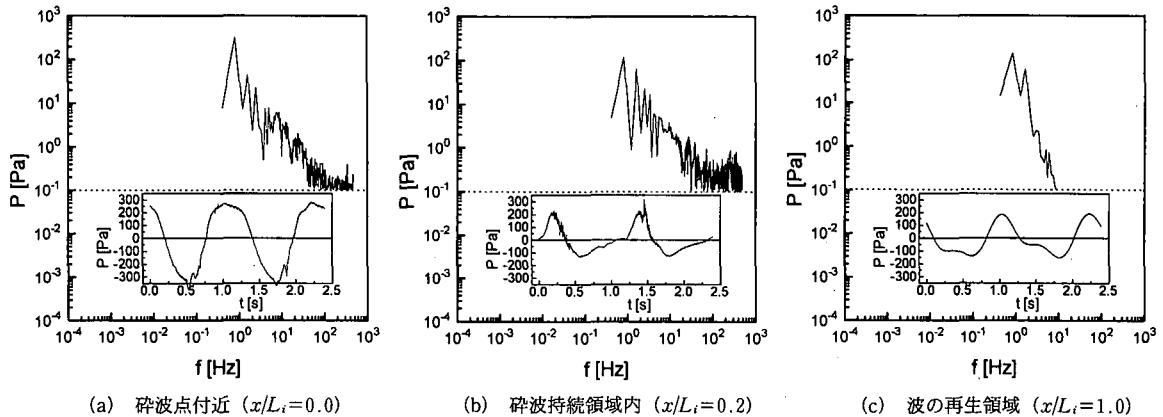


図-5 二段碎波の水中圧力の時間変動と圧力スペクトル分布 ($H_i/L_i=0.043$, $h/L_i=B/L_i=R/h=0.2$; $z/h=-0.2$)

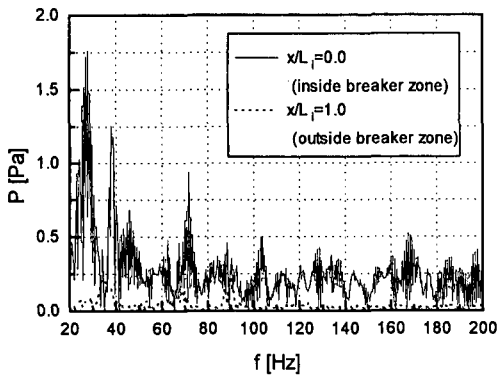


図-6 二段碎波による水中圧力差スペクトル ($H_i/L_i=0.043$, $h/L_i=B/L_i=R/h=0.2$; $z/h=-0.2$)

に、二段碎波の場合で構造物前面付近では、構造物上の強い戻り流れの影響から、構造物前面で碎波するとともに大規模な渦が形成されるため、波の峰と谷の両位置で圧力の高周波数成分の発生が認められる。

図-6に例示するように、構造物がない場合の入射波の圧力スペクトルの値を差し引いて、碎波により圧力レベルが増大する部分のみ抽出した圧力差スペクトルから、碎波によって生じる高周波数の圧力変動の特性をより詳細に考察する。碎波が持続している領域では、20 Hz以上の高周波数成分が卓越しているが、波が再生している領域においては、その周波数帯の成分は明瞭に認められない。このことから、碎波の影響により20 Hz以上の高周波数成分の圧力が発生していると推察され、碎波による乱れから水中で波動音が発生している可能性が高いと考えられる。紙面の制約上図示できないが、空中の音圧を含む圧力変動については、水中の圧力変動に比べてかなり値が小さいことを確認した。

7. 結 言

本研究では、水理模型実験と数値解析により、潜水構造物による碎波持続領域内における波動特性を議論してきた。碎波持続距離は、相対波高、無次元潜水深、無次元堤幅、水深波長比に概ね支配されていること、碎波持続領域では水中で波動音が発生している可能性が高いことを明らかにした。また、潜水構造物による碎波再生過程の数値解析をSOLA-VOF法により行い、自由水面の挙動特性および内部機構について考究してきた。

今後、碎波持続領域に関するより詳細な水理実験を行うとともに、碎波による乱れおよび気泡の挙動を表す物理モデルをSOLA-VOF法に組み込んだ新たな数値解析手法を開発して、水理実験および数値計算の両面から、潜水構造物による碎波再生過程の内部機構について引き続き考究していく所存である。

参 考 文 献

- 岩田好一郎・川崎浩司・金 度三 (1995): 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 781-785.
- 岩田好一郎・川崎浩司・安藤敏宏 (1996a): 潜堤による碎波特性とその内部機構に及ぼす波と潜堤の幾何スケール比, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 297-302.
- 岩田好一郎・川崎浩司・亀崎大輔 (1996b): 碎波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の細部構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 56-60.
- 片野良明・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 646-650.
- 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄 (1966): 潜堤による消波について, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 76-79.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Jour. of Comp. Phys., Vol. 39, pp. 201-225.
- Miche, A. (1944): Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante, forme limit de la houle lors de som déferlement, Application aux digues maritimes, Ann. Ponts et Chaussées, Tome 114.