

ステップ上の直立壁に作用する衝撃砕波圧と砕波形式の関係

安田孝志*・篠田成郎**・陸田秀実***・三浦修一****
Seyed Ali Azarmsa ***・榊原幸雄*****

1. 緒 言

混成堤などの直立壁には、条件によって非常に大きな衝撃砕波圧が生じる。このため、一般的にはこうした衝撃砕波圧が生じないように工夫されるが、それが困難な場合には衝撃波力係数を合田式に適用する方法によって衝撃砕波圧が算定され、これを基に設計上の対応がなされている。このため、種々の条件下での衝撃波力係数について研究（例えば、高橋ら、1992）が進められる一方、衝撃砕波圧の発生機構を解明し、これを基にモデル化を目指す研究（高橋ら、1983、荒見・服部、1990）も活発に進められている。こうした一連の研究の結果、砕波による空気塊の巻き込みの有無によって、衝撃砕波圧は Bagnold 型（減衰振動型）と Wagner 型（単発型）の 2 つのタイプ（高橋ら、1983）に大別されることが明らかになるなど発生機構の解明も進んで来た。しかしながら、荒見・服部（1990）によって衝撃砕波圧の発生自体が封入空気塊の断熱圧縮によっていると指摘されるなど、空気塊の役割に依然として不明な点がある上、空気塊が封入される条件や砕波形式との関係が必ずしも明らかにされていない。

そこで、本研究では、ステップ上の直立壁に孤立波を作用させ、砕波形式（崩れ波型および巻き波型）と空気塊封入および衝撃砕波圧との関係について実験的に検討するとともに、砕波圧における 2 つのタイプ（Bagnold 型および Wagner 型）と砕波形式の関係についても検討を試みる。また、砕波圧の特性を最大値および力積の両方からも検討し、砕波形式との関係を明らかにしたい。

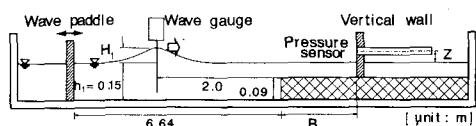


図-1 実験装置の概要

2. 実験装置と方法

前の波による擾乱のない状態で実験を行なうため、入射波を定常孤立波とし、安田・榊原（1992）の結果を基にその砕波形式を特定した。実験は、図-1 に示す 2 次元水槽（1 m×1 m×54 m）内にアクリル製の高さ 9 cm の模型ステップを固定して、その上に鋼材によって補強したアクリル製の高さ 60 cm の直立壁を設置して行なった。なお、直立壁の振動などの圧力計への影響を完全に除去するため、圧力計を取り付けた鉛直受圧板（2 cm×4 cm）を直立壁から分離した 2 重構造としている。

入射波はステップの前方 2 m の一様水深部（水深 $h_1 = 15$ cm）に設置した波高計で測定し、圧力の測定には半導体圧力センサー（受圧部直径 5 mm、容量 500 gf/cm²、共振周波数 10 kHz）を上述の受圧板に固定して行なった。なお、センサー受圧部には先端に直径 0.5 mm の穴が開いたシリコンオイル封入のアダプターを取り付けており、これによって作用点が非常に局部的な衝撃砕波圧のピンポイント検出が可能となっている。圧力計用のアンプの応答周波数は 100 kHz であり、サンプリング周波数 20 kHz で AD 変換を行なった。

実験では直立壁に崩れ波型から巻き波型までの砕波を作用させるため、3.3～8.7 cm の入射波高 H_1 の定常孤立波を造波させた。また、図-2 に示すように、直立壁を各入射波の砕波点の前後で移動させ、各位置において波圧を鉛直方向に 3 点（入射波の波頂点、静水面および静水面下 3 cm）で測定した。なお、図中の δ_r は砕波点を基準点としたときの直立壁位置を示す。また、直立壁上の波頂点の位置は安田ら（1991）のステップ上の孤立波の砕波限界波高式によって各入射波高ごとに決めた。

直立壁の砕波点位置に対する影響を明らかにするため、まず、直立壁のない場合の砕波点位置をビデオ画像によるジェットの発生点および波高計による最高水位点の一致点として決定した。ついで、直立壁を各砕波点に設置して入射波高を変化させ、最大波圧を与える入射波高の測定を行なう一方、直立壁を砕波点の前後数 cm の範囲で移動させ、最大圧力を与える位置を求め、最大波圧を与える入射波高と直立壁を調べた。その結果、同一

* 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 正 会 員 岐阜県庁

***** 正 会 員 工修 豊田工業高等専門学校助手 環境都市工学科

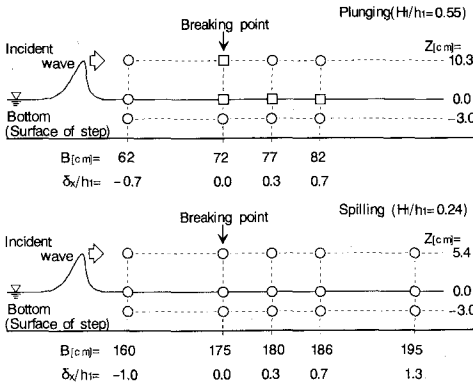


図-2 直立壁および圧力計の設置位置(○: 空気孔を設けなかった場合の圧力計位置, □: 空気孔を設けなかった場合と設けた場合の圧力計位置)

の入射波に対して直立壁のない場合の碎波点と直立壁への最大波圧の発生点がほとんど変わらないことが明らかとなり, 以下では, 碎波点位置は直立壁の影響を受けず, 直立壁のない場合の各入射波に対する碎波点を基準点として考察を進める。

3. 波圧波形と碎波形式の関係

各測点での波圧波形は直立壁に作用する波の状態に大きく依存する。ここでは, 波圧波形と直立壁位置との関係に及ぼす碎波形式の影響を明らかにするため, 入射波高比 $H_1/h_1=0.24$ (崩れ波型碎波) および $H_1/h_1=0.55$ (巻き波型碎波) の波を入射させる一方, 直立壁をそれぞれの碎波点およびその前後に移動させて波圧を測定した。

図-3 は, 直立壁を碎波点の前に設置したときの波頂点 (Wave crest point) および静水面での w_0H_1 で無次元化した波圧波形を示す。静水面での圧力波形には入射波による差異はほとんど見られず, ほぼ重複波圧的波形となっている。しかし, 波頂点では崩れ波型の方に鋭いピークが見られるなどの差異が見られ, 碎波前であるにも関わらず碎波形式の影響が既に顕われている。

図-4 は, 直立壁をそれぞれの入射波の碎波点に設置したときの鉛直方向 3 測点での波圧波形を示したものである。この場合, 波頂からの巻き込みジェットが直立壁に衝突し, 衝撃碎波圧が発生するが, 図-4 の波頂点での波圧波形はこのことを明瞭に示している。この時の圧力値は直径 0.5 mm のピンポイントにおけるものであるため, 巻き波型碎波の方がジェット量が多いことによる衝撃圧の作用時間の差異はあるものの, 波頂点という極く限られた範囲での波圧波形には碎波形式による差異はほとんど見られない。このことは, 巻き波型も崩れ波型も波頂点からジェットを放出させる点で共通しており, その放出の瞬間を普遍的な碎波限界として定義できること

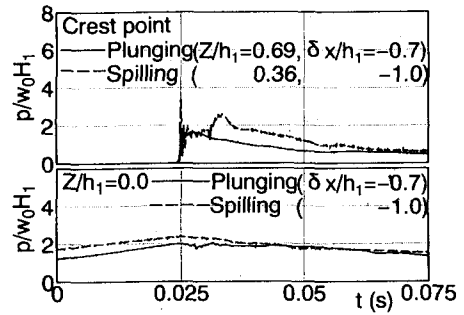


図-3 直立壁上の各点での碎波前の波圧波形

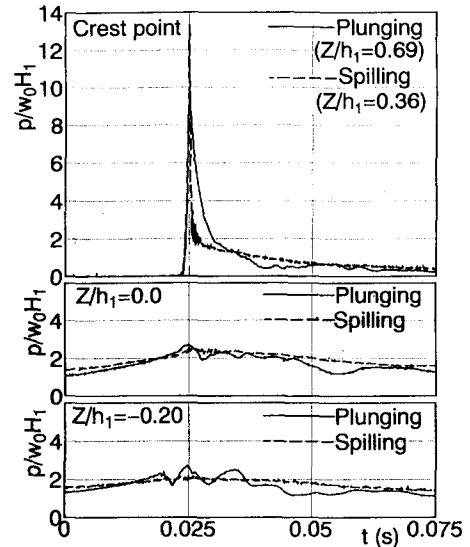


図-4 直立壁上の各点での碎波限界時の波圧波形 ($\delta x/h_1=0.0$)

を意味しているといえる。このように, 各入射波の波頂点位置ではいわゆる Wagner 型の衝撃碎波圧が碎波形式に関係なく生じるが, 静水面および静水面下 ($Z=-3$ cm) ではこのような衝撃碎波圧は見られず, 崩れ波型ではほぼ重複波圧となっている。これに対し, 巻き波型碎波の方には減衰振動型の波圧波形が見られ, むしろ静水面付近の方に碎波形式の影響が顕著になっている。

図-5 は, 同様にして碎波形式による碎波後の波圧の違いを示し, いずれの測点においても碎波形式の影響が明瞭になっている。波頂点の位置で見ると, 碎波点では碎波形式による差異はほとんど存在しなかったが, 碎波後では巻き波型碎波の圧力低下が著しいのに対し, 崩れ波型碎波による波圧波形にはなお鋭いピークが残り, 衝撃碎波圧が生じている。一方, 静水面では崩れ波型碎波による波圧がほとんど重複波型となるのに対し, 巻き波型碎波には波頂点よりも顕著な振動が見られる。こうし

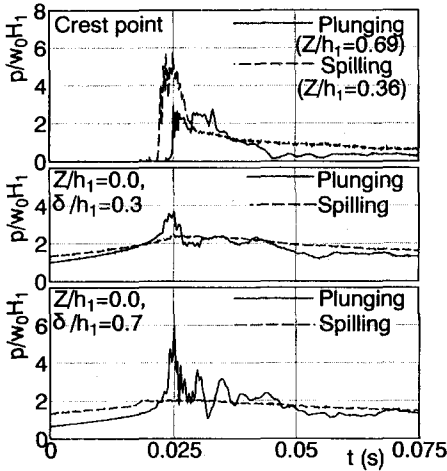


図-5 直立壁上の各点での砕波後の波圧波形

た振動型波圧は崩れ波型では全く見られないことから、巻き波型砕波によって巻き込まれた空気塊の圧縮によるものと考えられる。このように、入射波の砕波形式によって衝撃砕波圧のタイプだけでなく、最大波圧の発生点も水平および鉛直方向に変化する点に注意が必要である。

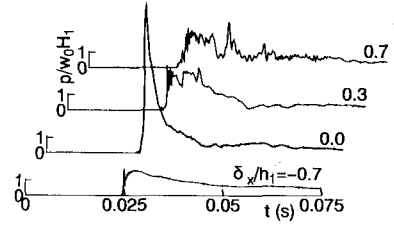
4. 波圧波形の直立壁位置による変化

ここでは、入射波の砕波形式に応じた波圧波形の直立壁位置による変化について考察する。図-6および7は巻き波型および崩れ波型砕波による波圧波形の空間変化を鉛直3測点でそれぞれ示したものである。前述と同様、巻き波型砕波の場合、砕波点のみで衝撃砕波圧が発生し、砕波後は急減している。しかし、静水面では砕波点より岸側に $\delta_x/h_1=0.7$ 離れた位置で、また静水面下3cmでは $\delta_x/h_1=0.3$ の位置で最も顕著な振動型の砕波圧が発生しており、波圧波形が直立壁や鉛直測点の位置によって大きく変化することがわかる。一方、崩れ波型砕波の場合、波頂点での圧力波形は砕波後も衝撃砕波圧の特性を残すものの、静水面では重複波圧となり、直立壁位置に波圧波形がほとんど無関係となっている。

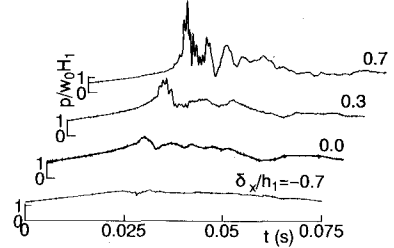
5. 波圧波形に及ぼす空気塊の影響

前節までの検討によって、砕波形式による波圧波形の違いは静水面付近での振動型砕波圧の発生の有無にあることが明らかになった。こうした振動型砕波圧の発生が巻き波型砕波に限られることから、その原因が封入空気塊にあることは容易に推察できる。ここでは、封入空気塊の影響を明らかにするため、直立壁に空気抜き用の穴を開け、空気を抜いた場合の実験結果との比較を行う。

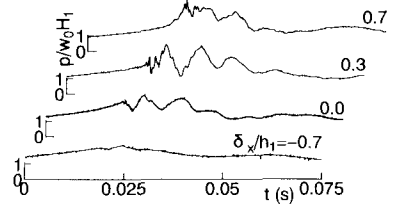
図-8は、入射波高 $H_1/h_1=0.55$ の巻き波型砕波に関



(a) 波頂点 ($Z/h_1=0.69$)

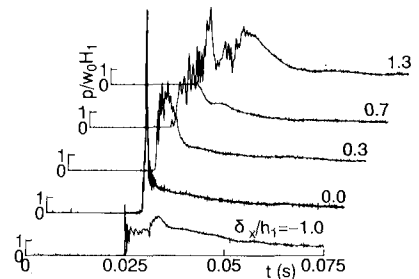


(b) 静水面 ($Z/h_1=0.0$)

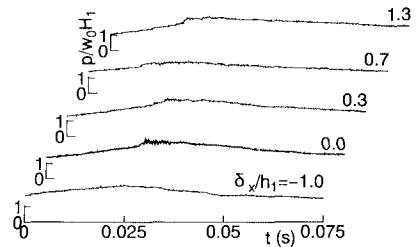


(c) 静水面下 ($Z/h_1=-0.20$)

図-6 巻き波型砕波の波圧波形の直立壁位置による変化 ($H_1/h_1=0.55$)

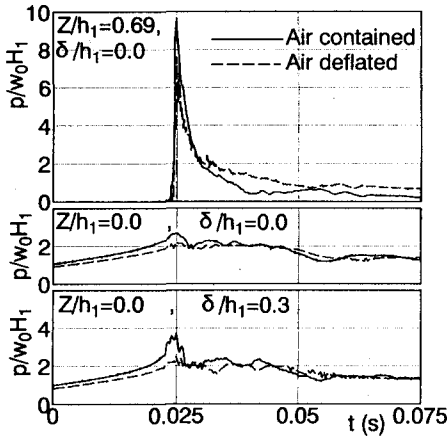


(a) 波頂点 ($Z/h_1=0.36$)



(b) 静水面 ($Z/h_1=0.0$)

図-7 崩れ波型砕波の波圧波形の直立壁位置による変化 ($H_1/h_1=0.24$)

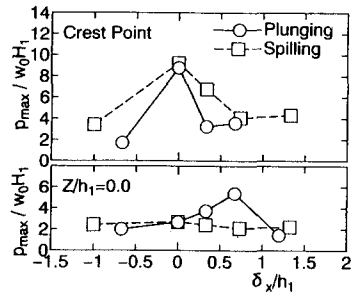

図一八 波圧波形に及ぼす空気塊の影響 ($H_1/h_1=0.55$)

して、空気を抜いた場合と抜かない場合の波圧波形を比較したものである。直立壁を砕波点に設置した場合の波頂点での砕波圧にはほとんど差異が顕れておらず、鋭いピークを持つ衝撃砕波圧に空気塊が無関係であることがわかる。このタイプの衝撃砕波圧が砕波形式に関係なく波頂部周辺にのみ発生することと併せ考えれば、その発生原因は波面の壁面衝突によっていることを実証するものと言える。これに対し、同じ砕波点でも静水面や砕波点の後では、空気を抜かない場合のいずれの波圧波形にも振動が見られるが、空気を抜いた場合の波圧波形にはこのような振動はほとんど見られず、封入空気塊が振動型砕波圧の発生原因であることは明らかである。

6. 砕波形式の最大波圧への影響

波圧波形のピーク値を最大波圧 $p_{\max}$ とし、その w_0H_1 に対する比 $p_{\max}/w_0H_1$ の空間変化に及ぼす砕波形式の影響について考察する。図一九は巻き波型および崩れ波型砕波による $p_{\max}/w_0H_1$ と δ_x/h_1 の関係を波頂点および静水面でそれぞれ示したものである。波頂点位置では砕波点の前後において崩れ波型砕波による方が巻き波型を上回るが、砕波点において両者の値はほぼ一致している。崩れ波型の方が砕波後も波高を長く保つため、砕波後の波圧が巻き波型によるものを上回るのは自然であり、また、砕波点において両者の値がほぼ一致するのもそれが共に波頂からの巻き込みジェットによっていることを考えれば当然と言える。このように、入射波の波頂点というピンポイントで見ると、崩れ波型の方が水平方向の広い範囲で巻き波型砕波よりも大きな波圧を発生させることになる。

一方、静水面では、空気塊の圧縮による衝撃圧が生じるため、巻き波型砕波圧の方が崩れ波型砕波圧によるものを上回るようになる。そして、 $p_{\max}$ が最大となる場所



図一九 最大波圧と直立壁位置および砕波形式の関係

も封入空気塊の圧縮が進んで最大となる砕波点からかなり離れた位置となっていることがわかる。

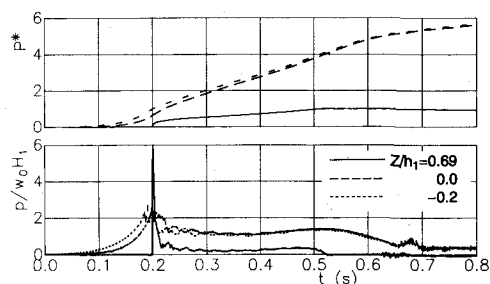
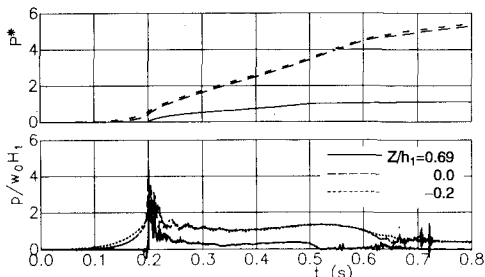
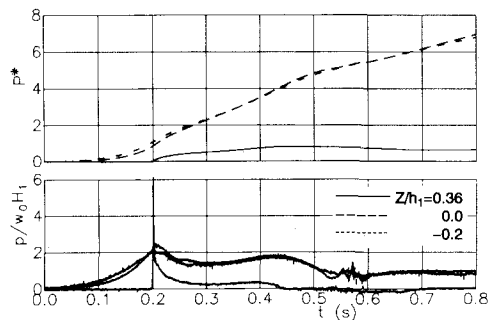
7. 砕波形式と波圧の力積の関係

力積は堤体の滑動量を支配する力学量として重要であり、それが光易 (1965) の言うように同一の入射波に対して不変であるとするなら、力積に対しては砕波形式の影響は存在しないことになる。そこで、無次元の力積を

$$P^* = \int_{t_0}^{t_0+T_w} \frac{p}{w_0H_1} d(t\sqrt{g/h_1})$$

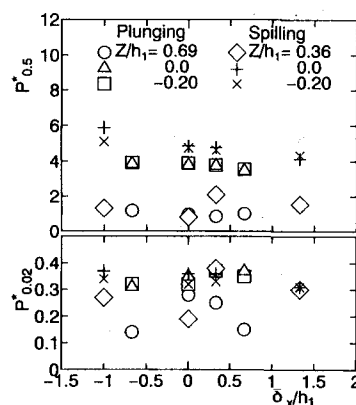
と定義し、この点に関する検討を行う。ここに、 t_0 は力積の計算開始時間および T_w はその積分時間である。

図一十は、波頂点、静水面およびその下の3測点での波圧 p/w_0H_1 と上述の力積 P^* の時間変化を巻き波および崩れ波型砕波に対してそれぞれ示したものである。なお、崩れ波型砕波の場合は砕波点のみであるが、巻き波型砕波の場合は直立壁を砕波点だけでなく、空気塊による衝撃砕波圧が最も顕著となっている $\delta_x/h_1=0.7$ の位置での結果も示している。波頂点に対する波圧の作用時間が短いため、波頂点での力積はいずれの場合も小さく、静水面付近での力積の方が大きい。したがって、滑動量が力積によって決まるとするなら、波頂点付近にしか現れない鋭いピークの衝撃砕波圧よりも静水面付近の通常の砕波圧の影響の方が大きいと言えそうである。また、静水面での波圧に対しては空気塊の影響が顕れ、 $p_{\max}$ の値は砕波後の方が大きくなっていったが、力積では若干ではあるが砕波点の方が大きくなっており、力積で捉える限り、空気塊の影響は光易が言うように顕われまいと言つてよい。さらに、崩れ波型砕波による静水面での力積を見ると、この場合は $p_{\max}$ とは逆に巻き波型砕波によるものを若干上回っており、空気塊は力積をむしろ減少させている。これは、力積が空気の熱運動に転化されると考えれば納得できる。また、作用時間を0.5秒以上とした力積およびこの間の圧力はほとんど一定であり、その値も入射波高のみによっておりここに広井式の堤体の滑動安定に対する妥当性の根拠があると考えられる。

(a) 巻き波型の砕波点 ($H_1/h_1=0.55$, $\delta_x/h_1=0.0$)(b) 巻き波型の砕波後 ($H_1/h_1=0.55$, $\delta_x/h_1=0.7$)(c) 崩れ波型の砕波点 ($H_1/h_1=0.24$, $\delta_x/h_1=0.0$)

図一10 波圧とその力積の時間変化

こうした力積と砕波形式や直立壁位置の関係を全体的に捉えるため、図一10を基に積分時間 T_w を 0.02 および 0.5 秒としたときの力積 $P_{0.02}^*$ および $P_{0.5}^*$ と直立壁位置、鉛直方向測点位置および砕波形式の関係について調べる。ここで 0.02 秒は衝撃砕波圧のピーク値の持続時間であり、0.5 秒は力積の立ち上がりからほぼ一定値となるまでの時間である。図一11 は、この結果であり、 $P_{0.02}^*$ について見ると、波頂点では砕波形式による違いが大きく、前述の図一9 の $p_{\max}/w_0 H_1$ と異なり、砕波点で巻き波型砕波による $P_{0.02}^*$ の方が崩れ波型のものを若干上回っている。しかし、静水面やその下では砕波形式による違いはほとんど見られない。一方、 $P_{0.5}^*$ について見ると、波頂点よりも静水面付近における方がはるかに大きくなっているが、砕波形式や直立壁位置の影響はほとんど見られず、 $P_{0.5}^*$ に対しては直立壁方向の測点位置の影響のみ



図一11 砕波点からの直立壁位置と力積との関係

が顕われるに過ぎないことがわかる。

8. 結 語

ステップ上の直立壁に孤立波を作用させ、砕波形式と衝撃砕波圧の関係について検討を行なった。その結果、砕波点に設置された直立壁の波頂点付近に生じる鋭いピークを持つ衝撃砕波圧は、砕波形式に関係なく生じるのに対し、静水面付近に発生する振動型衝撃砕波圧に対しては砕波形式の影響が明瞭に顕われることが明らかとなった。このような静水面付近に生じる振動型砕波圧は、巻き波型砕波によって封入される空気塊に原因しており、崩れ波型砕波では単なる重複波圧が生じるに過ぎない。砕波形式の影響は、封入空気塊の有無とそれに伴う振動型砕波圧発生の有無として顕われるが、波頂点での衝撃砕波圧や砕波圧の力積にはほとんど顕われて来ないことが明らかとなった。最後に、本研究が文部省科研費一般 B (04452233) による成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 荒見淳史・服部昌太郎 (1990): 衝撃砕波圧の算定モデル, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 629-633.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司 (1983): 直立壁に作用する衝撃砕波圧の発生機構に関する一考察, 港研報告, 第 22 巻, 第 4 号, pp. 3-31.
- 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.
- 光易 恒 (1965): 波圧論, 水工学シリーズ B65-6, 土木学会水理委員会, pp. 1-25.
- 安田孝志・榊原幸雄 (1991): ステップによる孤立波の砕波形式の定量的評価と支配法則について, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 51-55.
- 安田孝志・原 正典・榊原幸雄 (1991): BIM を用いたステップによる孤立波の砕波を伴う変形とその法則, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 87-96.