

衝撃砕波圧におよぼす直立壁体の変形効果

由井孝昌*・服部昌太郎**

1. 研究の目的

これまでなされてきた直立式構造物に作用する衝撃砕波圧(波力)に関する数多くの実験的研究では、構造物は変形しない直立壁を対象として、入射波の特性やその衝突条件などとの関連で、波圧特性が検討されている。

構造物設計では滑り・転倒に対する構造物の安定性に加えて、作用衝撃波圧による直立壁体の変形挙動を考慮して構造部材の設計計算が行われる。衝撃砕波力により捨石マウンド上に設置した直立防波堤の滑動とロッキング現象に関しては、これまで理論的・実験的検討(例えば、林・服部・林, 1960; 林・服部, 1963; 谷本・木村・宮崎, 1988)がなされている。しかし、衝撃波圧におよぼす壁体の変形応答効果を検討した研究は、Kirkgoz と Mengi (1987), Witte (1988) および Kirkgoz (1990) があるにすぎない。

以上のことから、直立構造物の設計にとって重要である、この問題に対する基礎的情報と我々の理解を深めるため、本研究では直立壁体の剛性(壁厚)を変化させ、壁面の弾性変形が衝撃波圧特性—最大波圧、波圧時間変化、波圧振動—におよぼす効果を、壁面剛性が極めて高い場合との比較によって検討することとした。

2. 衝撃砕波圧特性の概要

本研究の目的である衝撃波圧と壁面変形間の相互作用を検討するに先立ち、剛な直立壁に対するこれまでの実験によって確認されている、衝撃砕波圧の発生とその特性の概要を以下に示す(例えば、合田・原中, 1967, Chen・Melville, 1988; 荒見・服部, 1989a と b, 1990)。

(1) 衝撃波圧は、砕波衝突時に壁面と波面間に封入される空気塊の断熱圧縮過程に関係する(Bagnold, 1939)。

(2) 封入空気が存在しない場合でも、衝突波面の flipthrough 現象(Cooker・Peregrine, 1990)により、弱い衝撃圧が発生する。

(3) 衝撃波圧特性は、封入空気量が極めて少ない場合に単発形衝撃圧、空気量が増加するに従い衝撃圧直後に減衰振動波圧が出現する。

(4) 封入空気厚(l)が増大すると最大衝撃波圧(p_{max})は低下し、衝撃圧の立ち上がり時間—圧縮時間—(τ)は増加、そして減衰波圧振動数(f)は減少する。

上記の事項を踏まえて、本問題の検討を行う。

3. 実験装置と測定方法

実験は、反射吸収式フラップ造波装置を備えた両面ガラス張り二次元波動水槽(0.3 m×0.55 m×20 m)内に設置した 1/20 勾配斜面上に、直立堤体を固定して行った(図-1)。

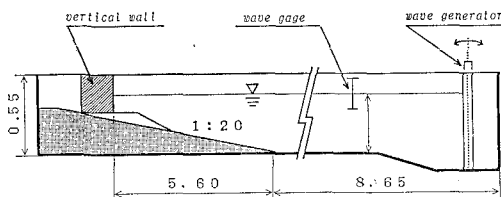


図-1 実験装置の配置 (単位: m)

直立堤体前面は、鉄製枠に四辺固定した板厚 25 mm, 20 mm, 10 mm の三種類の透明プラスチック板を使用した。予備実験からえられた固定プラスチック板の固有振動数 f_N は、1.2 kHz, 0.8 kHz, および 0.5 kHz である。壁面への砕波衝突が安定して起こるよう、捨石マウンドに相当する前面勾配 1/10 のプラスチック製マウンドが、堤体の下面に置かれている。

波圧測定は、直立壁前面の中心線上の 6 測点(静水面基準: 2.0 cm 間隔)に半導体圧力計(直径: 10 mm, 容量: 200 g/cm², 固有振動数: 9.2 kHz)を、また壁面変動は壁面背面の中心位置に加速度計として圧力計を設置して行った。

波圧測定出力は動歪増幅器で増幅した後、サンプリング周波数 5 kHz で二台のデジタル記録計に収録し、電算処理をした。

波圧測定と同時に、砕波の壁体への衝突状況を高速ビ

* 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

デオ (200コマ/s) で撮影記録した。測定波圧記録とビデオ画像とのマッチングは、ビデオ画像上に表示される静水面での波圧記録によって行った (写真-1)。また、衝突時の碎波諸量と封入空気塊の形状と寸法は、水槽側面の 2.0 cm の正方格子を用いて29インチビデオ上の静止画面から読み取った。

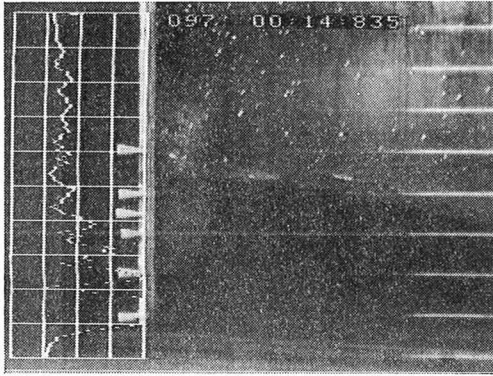


写真-1 碎波衝突状況と波圧記録の例
(矢印は波圧測定位置を示す)

碎波自体が不安定性の高い現象である上、直立壁の反射と衝突擾乱の影響によって碎波の直立壁への突入状況が衝突ごとに変化し、このため衝撃波圧が不規則に変動する原因となる。そこで、本実験での再現性を高めるため、以下のようなことを行った。すなわち、(1) 先行実験による水面擾乱が十分静まったことを確認する。(2) 規則波の造波信号により同一条件で造波装置を駆動する、(3) データ解析は、造波開始後の3～6波を対象とする。

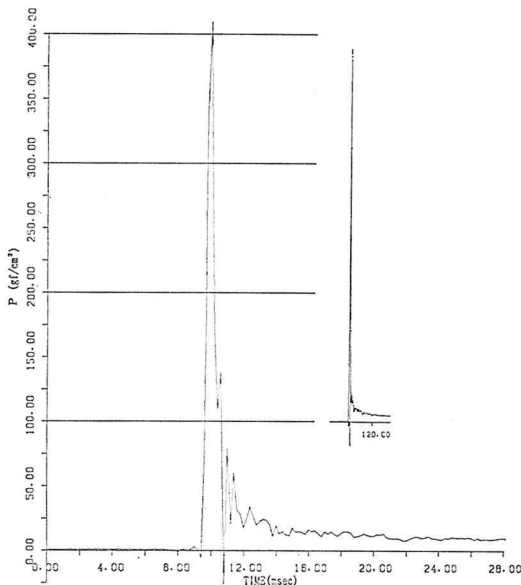


図-2 単発形衝撃波圧波形 (壁厚 20 mm)
($H_I=4.5$ cm, $T=1.7$ s: $p_{\max}=408.9$ gr/cm², $\tau=0.4$ ms)

実験は、直立壁前面水深を 5.0 cm, 入射波周期は 1.7 s と 2.0 s とし、水槽一様水深部での進行波としての波高を変化させて行った。

4. 実験結果とその考察

4.1 衝撃波圧の時間変動

封入空気塊が極めて小さい場合と大きい場合の、碎波先端衝突地点と見られる静水位での典型的な波圧時間記録によって検討を行う。

(a) 単発形衝撃圧

剛性の高い堤体で典型的な単発形波圧 (時間波形: 荒見・服部, 1989 の図-2) を発生する封入空気塊が非常に小さい場合の波圧波形を、最大波圧発生時刻を $t=10$ ms として 図-2 と 3 に示す。

図-2 は壁厚 20 mm の場合の波圧記録で、衝撃波圧の圧縮時間 τ は 0.4 ms, $p_{\max}=408.9$ gf/cm² である。最大衝撃圧直後の圧力変動に 1.2 kHz 程度の高周波の振動が認められ、その継続時間は非常に短い。この圧力振動は、碎波衝突の瞬間に封入空気泡の一部が離脱したために発生し、衝撃波圧後の振動は封入空気塊の振動であることが、ビデオ画像から認められた。

図-3 は壁厚 10 mm に対するもので、波圧変動とともに壁面変動記録が示されている。波圧記録に見られるように、 $p_{\max}=377.6$ gf/cm², $\tau=0.4$ ms と 図-2 に較

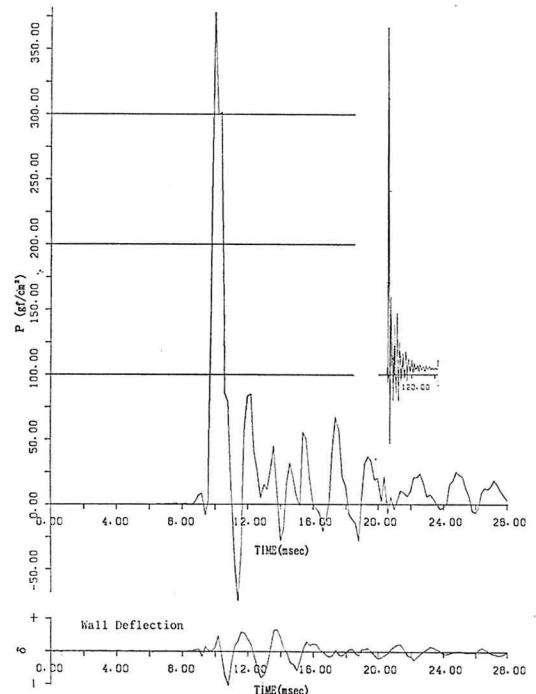


図-3 単発形衝撃波圧波形 (壁厚 10 mm)
($H_I=4.4$ cm, $T=1.7$ s: $p_{\max}=377.6$ gr/cm², $\tau=0.4$ ms)

べて若干 $p_{\max}$ は低い 衝撃波圧が発生している。さらに、衝撃波圧直後に壁面の振動数 $0.5 \sim 0.6 \text{ kHz}$ に相当する圧力変動が認められ、これが継続している。壁面変位は、最大波圧発生時より 0.7 ms 遅れて衝撃圧が急低下する時点で生じ、衝撃波圧終了時点でその振幅は最大となる。壁面振動は波圧変動の位相とに若干の遅れがあるが、波圧変動に追従して変動していることがわかる。

(b) 減衰振動衝撃波圧

封入空気塊量が増大すると $p_{\max}$ が低下する傾向は、これまでの実験と同様に認められる。衝撃波圧特性に認められる特徴的な変化は、衝撃波圧に続く減衰振動に見られる。図-4 と 5 は、壁厚 20 mm と 10 mm の最大衝撃波圧 $p_{\max}$ と減衰振動波圧の振動数 (0.25 kHz) がほぼ同程度の波圧記録である。

図-4 の場合の壁面変動は非常に僅かで、壁体が剛である場合の波圧記録と同様に、波圧の減衰振動が持続している。この原因として、波圧振動数が壁面の固有振動数 0.8 kHz に較べ低周波数であることが挙げられるが、より詳細な検討が必要と考えられる。波圧振動数は壁厚 10 mm の固有振動数 (0.5 kHz) の $1/2$ であり、図-5 に見られるように、衝撃圧が比較的低いにも関わらず壁面は顕著な変動を示している。また、波圧振動は数波で急速に減衰している。

Toplis (1991) は円筒状の二次元空気塊の固有振動数の理論計算、また荒見・服部 (1990) はピストンモデルで波圧振動数の算定式を提案している。図-4 と 5 の波圧振動数は、空気塊形状測定結果より Toplis と荒見・服部のモデルから算定される振動数とはほぼ一致することから、その主要な発生機構は空気塊の圧縮・膨張 (断熱過程) によると判断される。衝撃波圧振動の減衰機構に関しては、水面・壁面の効果以外に様々な原因 (例えば、Devin, 1959) が考えられているが、まだ主要な原因を特定するまでにはいたっていない。しかし、壁面変動を伴う場合には、封入空気塊の圧縮エネルギーの一部が、壁面の変形により吸収されることが確認された。また、壁体面への波の打ち上げにより封入空気塊は上方に引き延ばされ、空気塊厚が減少する。このため、空気塊の外周への脱出がなくても、圧力変動周波数が若干増加することが、ビデオ画像と波圧記録との比較から明かとなった。

4.3 Flip-Through による波圧変動

図-6 は壁面が剛、図-7 は壁厚 10 mm の場合、空気塊を連行せずに、碎波が壁面に衝突する時に見られる波圧記録である。写真-2 は、その衝突時における碎波の変形・衝突状況を示す連続画像 ($\Delta t = 0.5 \text{ ms}$) である。衝突直前で碎波波面の挙動は、ほぼ垂直 (壁面) に平行に立ち上がり、壁面前面水位の上昇速度と碎波面の

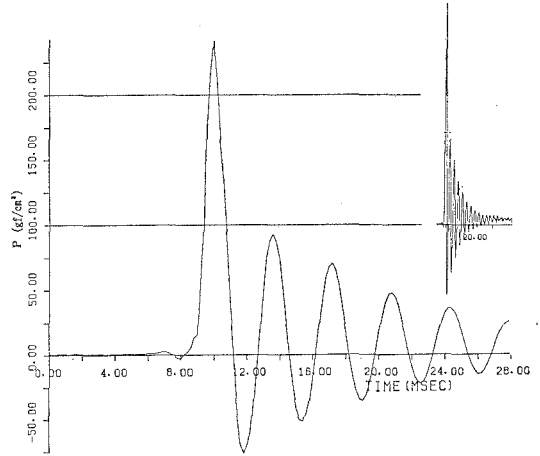


図-4 減衰振動波圧記録 (壁厚 20 mm)
 $(H_I = 4.3 \text{ cm}, T = 1.7 \text{ s}; p_{\max} = 240.7 \text{ gr/cm}^2, \tau = 0.8 \text{ ms})$

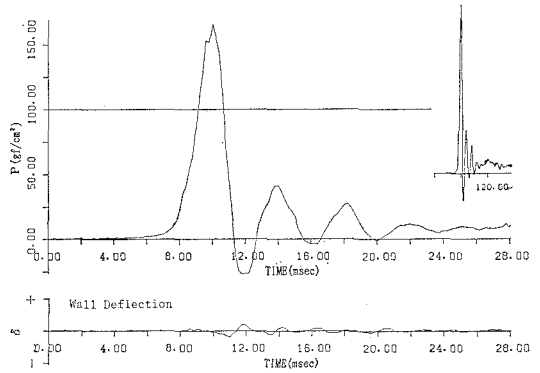


図-5 減衰振動波圧記録 (壁厚 10 mm)
 $(H_I = 4.4 \text{ cm}, T = 1.7 \text{ s}; p_{\max} = 165.2 \text{ gr/cm}^2, \tau = 1.4 \text{ ms})$

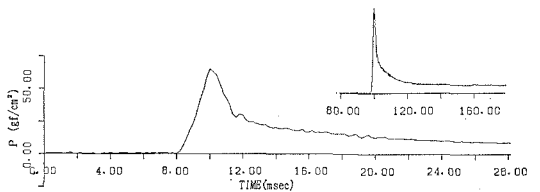
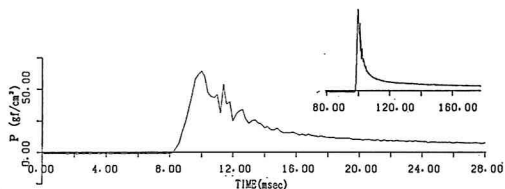


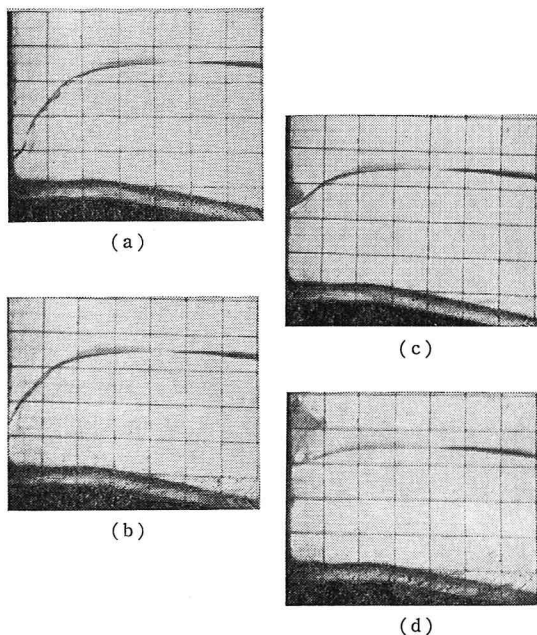
図-6 Flip-through の波圧記録 (剛な場合)
 $(H_I = 4.5 \text{ cm}, T = 1.7 \text{ s}; p_{\max} = 64.7 \text{ gr/cm}^2, \tau = 1.2 \text{ ms})$

前進速度はほぼ同程度となっている。衝撃波圧の τ は 1.2 ms と長く、入射波高が小さいため $p_{\max}$ は小さい。Cooker と Peregrine (1990) は、数値計算によりこの様な碎波面の衝突で衝撃圧が発生することを示し、flip-through 現象と呼んでいる。

$p_{\max}$ が小さいことから、壁面変動は検出されないにもかかわらず、図-7 の波圧記録には周波数が 1 kHz 程度の圧力変動が認められる。一方、壁面が剛である図



図—7 Flip-through の波圧記録 (壁厚 10 mm)
 $(H_f=3.6 \text{ cm}, T=1.7 \text{ s}; p_{\max}=63.9 \text{ gr/cm}^2, \tau=1.2 \text{ ms})$



写真—2 Flip-through の発生状況

—6 には、このような波圧変動が認められない。碎波面の衝突は、壁面下部から上方に向かって連続して起こっていることから、壁面が高次のモードで振動することによって、周波数の高い波圧変動が記録されたことも考えられるが、明確な結論をうるには到っていない。この問題は今後の検討に委ねることとする。

5. 壁面変形

Kirkgoz (1990) は、10 mm 鉄板 (2.00 m×0.47 m) を上端固定、下端は単純支持、側端は自由として、実験を行っている (固有振動数は明記されていない)。その結果、衝撃碎波により生ずる最大壁面変位は、 $p_{\max}$ 発生時から若干遅れ、衝撃波圧の圧縮時間 τ が長く $p_{\max}$ が低い場合の変位量が大きいことを指摘している。

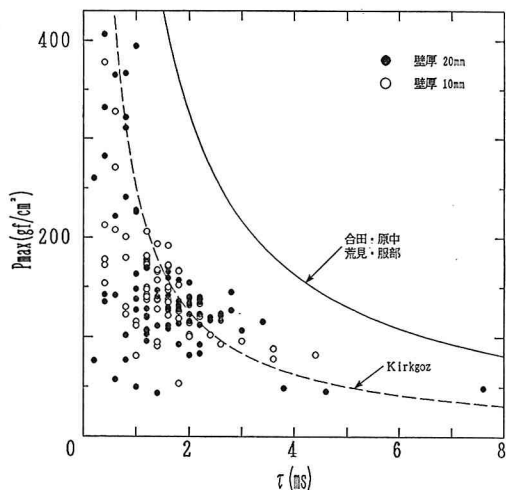
Kirkgoz の実験では、壁面変位 (変位計により測定、周波数特性は記載無し) は波圧変動と関係なく、最大変位まで比較的単調に増加している。一方、本実験では、図—4 と 6 に見られるように波圧変動と対応して、壁面も振動している。このような壁面変形挙動の違いは、実験

と測定方法に原因しているとも考えられるが、より本質的な検討を行うことを計画している。

6. 最大衝撃波圧と圧縮時間

入射波特性が同じでも衝突状況の微細な変動により、最大衝撃波圧は大きく変化するが、波圧の力積はほぼ一定となることが、多くの実験から認められている。

壁面変形の効果が、衝撃波圧特性にどのような影響をもたらすかを調べるため、静水面付近での $p_{\max}$ と τ との関係をプロットしたものが 図—8 である。図中には、本実験と実験条件がほぼ等しい剛な壁面に対する合田・原中 (1967) と荒見・服部 (1990)、および Kirkgoz (1990) の実験結果の包らる線を、実線と破線で示している。



図—8 $p_{\max}$ と τ との関係

図—8 に見られるように、実験条件の違いを考慮しても、壁面が剛である場合に較べて壁面変形が発生する場合には、最大衝撃波圧は低下している。Kirkgoz の実験結果は、壁面支持の方法が異なるが、本実験とはほぼ一致している。

上記以外の、図—8 より認められる主要な事項として、

(1) 衝撃波圧の特性を反映して $p_{\max}$ は非常に幅広く変動しているが、力積一定を示す $p_{\max} \sim \tau^{-1}$ の関係は維持されている。

(2) 壁面変位が生ずる場合、衝撃波圧の立ち上がり時間 (圧縮時間) τ が壁面の固有振動周期 (図—8 では、 $\tau=1 \text{ ms} \sim 2 \text{ ms}$) とほぼ等しくなる衝突状態では、 $p_{\max}$ の低下傾向はより顕著となる。

(3) $p_{\max}$ の低下原因として、碎波の衝突エネルギーの一部が、壁面変形に吸収されることがあげられる。

7. 結 論

本研究では、これまで殆ど検討がなされていない、衝撃砕波圧と衝突による直立壁の変形との相互作用に関して実験を行い、その基本的挙動を調べた。本研究で見いだされた主要な事柄を、以下に列記する。すなわち、

(1) 砕波水塊の衝突は壁体振動を誘起するが、最大衝撃波圧は Bagnold モデルで示されるように、封入空気量が少ないほど大きくなる。

(2) 壁面変位は、最大波圧発生時より遅れて衝撃圧が急低下する時点で生じ、衝撃波圧終了時点でその振幅は最大となる。壁面振動は波圧変動の位相とに若干の遅れがあるが、波圧変動に追隨して変動する。

(3) 壁面変形の効果により、最大衝撃波圧は剛な壁面に較べて低下し、衝撃波圧の立ち上がり時間が壁体の固有振動周期とほぼ一致する場合には、波圧低下傾向は顕著となる。この原因として、砕波の衝突エネルギーの一部が、壁面変形に吸収されることがあげられる。

(4) 封入空気量が増加すると、衝撃砕波圧の立ち上がり時間(圧縮時間)は増加し、最大衝撃波圧とそれに続く減衰波圧振動の周波数は低下する。

(5) 最大衝撃波圧は砕波の衝突状況に大きく影響されて変動するが、これまでの剛な壁面の場合と同様に、その力積はほぼ一定となる。

(6) 封入空気塊による圧力減衰振動数は断熱圧縮振動の固有振動数とほぼ一致し、空気塊形状の圧縮変形と共に増大する。

謝辞：実験とデータ整理には、当時中央大学海岸工学研究室学部学生の山下則男君(現在熊谷組)の協力をえた。ここに記して謝意を表する。また本研究の一部は、文部省科学研究費(特定研究 研究代表者 服部昌太郎)の補助により行った。

引 用 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎(1989a): 衝撃性砕波圧の発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 579-583.
- 荒見敦史・服部昌太郎(1989b): 衝撃性砕波圧の実験的研究, 中央大学紀要, 第32巻, pp. 37-63.
- 荒見敦史・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.
- 谷田良実・原中祐人(1967): 衝撃砕波圧に関する一実験, 港湾技研資料, No. 32, pp. 1-18.
- 谷本勝利・高橋重雄・吉元靖俊(1983): 衝撃波圧とその測定について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 317-321.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司(1988): 水深混成堤の直立部に働く波力と滑動安定性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 637-641.
- 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉(1960): 砕波の圧力と壁体の滑動, 第7回海岸工学講演集, pp. .
- 林 泰造・服部昌太郎(1963): 砕波の波圧について, 第10回海岸工学講演集, pp. .
- Bagnold, R. A. (1939): Interim Report on Wave-Pressure Research, Jour. I.C.E., Vol. 12, pp. 202-226.
- Chen, E.S. and W.K. Melville (1988): Deep-water plunging wave pressures on a vertical plane wall, Proc. Royal Soc. London, A, 417, pp. 95-131.
- Cooker, M. J. and D. H. Peregrine (1991): Wave breaking and wave impact pressures, Developments in Coastal Engineering, Univ. of Bristol, pp. 47-64.
- Devin, C. Jr. (1959): Survey of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water, Jour. Acoustical Soc. of America, Vol. 31, No. 12, pp. 1654-1667.
- Kirkgoz, M. S. and Y. Mengi (1986): Dynamic response of a caisson plate to wave impact, ASCE, Jour. Wat Way, Port, Coastal and Ocean Engng., 112, pp. 284-295.
- Kirkgoz, M. S. (1990): An experimental investigation of a vertical wall response to breaking wave impact, Ocean Engng., Vol. 17, No. 4, pp. 379-391.
- Topliss, M. (1991): Mathematical description of air bubbles in water, Master Thesis, Univ. of Bristol, 69 p.
- Witte, H.H. (1988): Wave-induced impact loading in deterministic and stochastic reflection, Mitteilungen, Leichtweiss Inst. fur. Wasserbau, Tech. Univ. Braunschweig 102, pp. 1-227.