

衝撃砕波圧の算定モデル

荒見 敦史*・服部 昌太郎**

1. はじめに

土木技術の進歩にともない、より一層の合理化と経済化と同時に安全性の向上が、海岸・港湾構造物の設計と施工にも要請されている。この状況を反映して、構造物に作用する砕波の衝撃砕波圧の算定法を確立するため、その発生機構をより詳細に解明する研究が再び行われている [Chan・Melville, 1988, 荒見・服部, 1989]。その結果、直立壁と衝突砕波波面間に封入される空気塊の、断熱圧縮が衝撃波圧の発生機構であるとする、Bagnold 説の妥当性が再確認された。著者らは衝撃波圧として、単発型と減衰振動型の二形式が存在し、その発生には封入空気塊の規模と離脱挙動とが関係することを報告した。しかし、その後行った実験より、衝撃波圧には圧縮空気塊の外部への離脱は殆ど関係しないことが認められた。

本報では先ずその結果と共に衝撃波圧の空間分布を報告し、続いて封入空気塊の断熱圧縮過程に基づく波圧算定法を提案する。

2. 実験装置と測定方法

実験は、反射吸収式造波装置を備える両面ガラス張りの二次元波動水槽 (0.30 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。直立堤体面に鉛直方向 5 ケ所と静水面位置の水平方向の 3 ケ所に半導体波圧センサー (直径 10 mm ϕ , 応答周波数 4600 Hz) を配置して、波圧の空間分布を測定した。波圧測定出力は動歪アンプ (応答周波数 5000 Hz) で増幅後、サンプリング周波数 2000 Hz でデジタル記録装置に収録して電算処理した。直立堤体へ入射する砕波とその衝突状況は高速ビデオ装置 (NAC 製, 毎秒 200 コマ) で撮影し、29 インチ画面上のフィールド再生画像より衝突砕波、封入空気塊などの諸量を読み取った。封入空気塊の離脱状況は水槽側方と直立壁背面からビデオ撮影して波圧出力と同時にビデオカメラの撮影パルス信

号を記録し、波圧測定記録とビデオ画像との同期を行った。波高計測は、一様水深部 ($h=36$ cm) に設置した容量式波高計で行った。実験条件は、入射波高 7~9 cm, 周期 1.4, 1.7, 2.0 秒, 堤体前面水深 5.0 cm である。実験・測定データ処理の詳細は、前報 (荒見・服部, 1989) に記載されている。

3. 衝撃波圧の発生と空間分布

3.1 衝撃波圧と封入空気塊の挙動

図一1 (a)~(d) と写真一1 (1)~(6) は、減衰振動型衝撃波圧の波圧波形と同期記録した、その砕波の衝突状況の拡大画像記録の一例である。波圧波形の横軸の 5 ms 毎に刻まれた目盛りにつけられた数字は、画像記録上方の数字の下三桁で表示されている時間 (ms) である。砕波波頂が直立壁に衝突する時刻は 025, 衝突地点は静水面上方の圧力センサー P_4 の直下で (図一1 (a)) で、圧力波形の立ち上がり直前の負圧発生によっても確認される (Chan・Melville, 1988)。直立壁と衝突砕波波面間に封入された空気塊は小気塊に分断され、波の打ち上げにより上方に移動している (写真一1 (3))。そして、封入空気塊の外部への離脱は時刻 110 (写真一1 (5)) で開始し、この時刻では衝撃波圧振動は既に終息している (図一1)。封入小気塊群の上方への移動と同時にその一部は下方にも押し下げられ、気塊層が薄い部分の壁面に再び衝撃性の波圧が作用する (時刻 100 付近: 図一(c): P_2 と (d): P_1)。壁体下部でのこのような波圧変動発生は、堤体前面の捨石マウンドの安全性にも大きな影響を持つ可能性があると考えられる。

最大波圧発生時までの空気塊の平均圧縮変形速度 U_a と衝突波面速度 u_b との比 U_a/u_b は、実験データに若干のばらつきがあるものの平均的に $U_a/u_b=0.5$ 程度であり、空気塊の圧縮変形速度はほぼ直線的に減少すると推定される。封入空気塊厚が減衰振動型に較べて極めて薄い単発型衝撃波圧に対しても、衝撃圧終了時にも空気塊がほぼ完全に残留している状況が確認された。以上の実験結果より、衝撃砕波圧の発生は封入空気塊の断熱圧縮が主要因であるが、前報 (1989) の図一4に記載した

* 工修 石川島播磨重工業(株) 鉄鋼事業部設計部

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

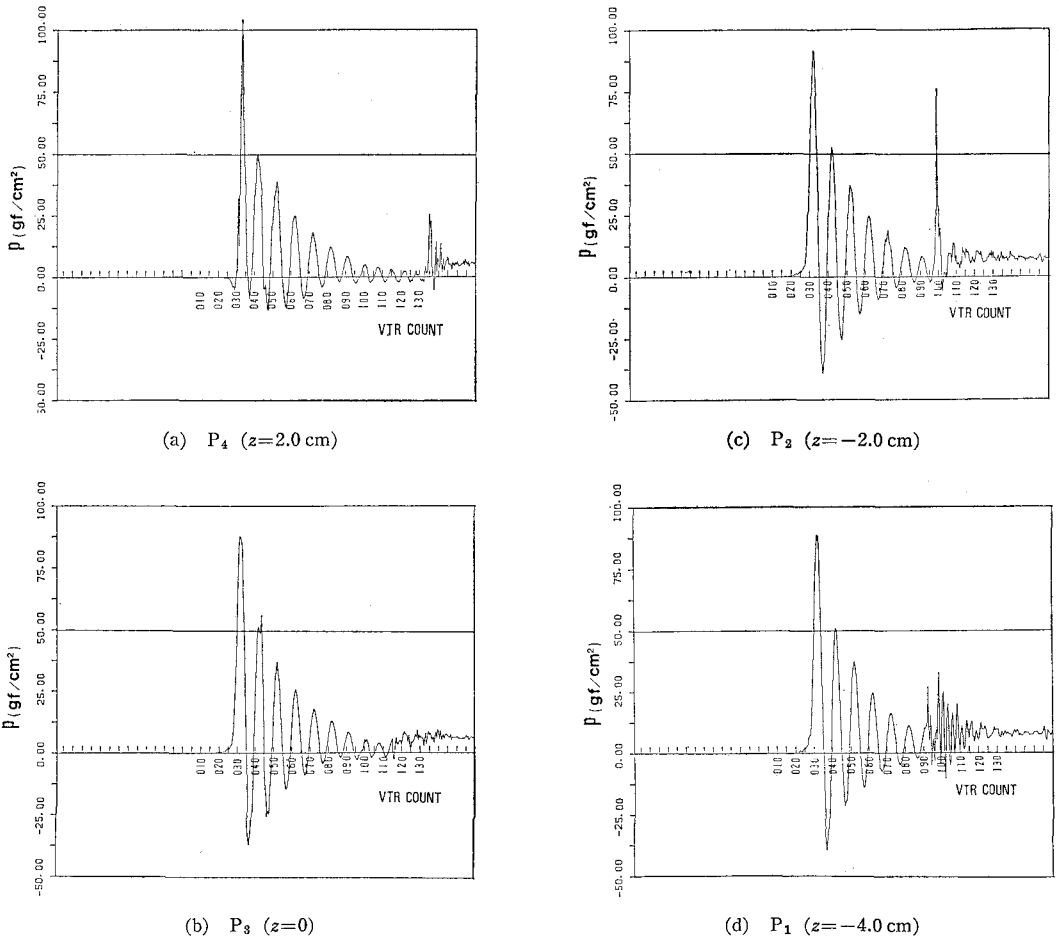


図-1 減衰振動型衝撃波圧の記録波形 (横軸は VTR 画像のカウンター: 単位 ms)

圧縮空気塊離脱と波圧変動(振動)との関係は、誤りであることが指摘されここに訂正する。

3.2 波圧振動の減衰機構

図-2 は、減衰振動型波圧の減衰特性を示す実験結果例で、各振動ピーク波圧 p_n と最大波圧 p_{max} との比 p_n/p_{max} と p_{max} の発生時刻を基準とした p_n までの時間 $(t_n - t_p)/\tau_s$ との関係である (τ_s : p_{max} の作用時間)。Mitsuyasu (1966) は、圧縮空気塊の離脱が波圧減衰振動の主要因とした解析を行っている。しかし、図-2 の実験結果にも見られる様に、減衰振動の発生は圧縮空気塊の外部への離脱によらないことから、その減衰機構としてまず第一に空気塊内部に発生する小気塊群の流動抵抗があげられる。それ以外に、圧力波(弾性)の水中伝播によるエネルギー逸散、堤体振動によるエネルギー吸収などが考えられるが、これら減衰機構の特定を現在試みている。

3.3 衝撃波圧の空間分布

単発型と減衰振動型の最大波圧の特徴的な鉛直分布

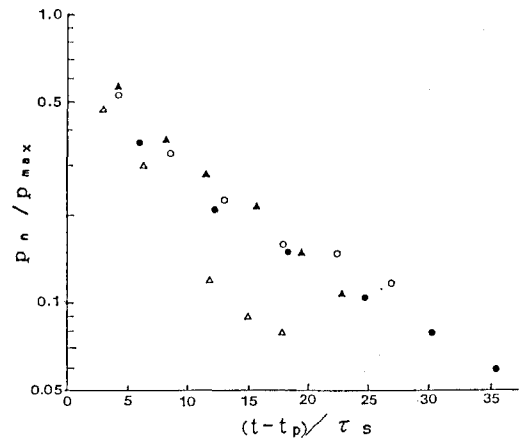


図-2 波圧の減衰振動特性

を、 $p_{max}/p_{s max}$ と z/h_0 との関係で図-3 に示す。単発型の鉛直分布は、これまで報告されている(和田・橋本・藤森, 1965) 三角形分布とほぼ一致し、分布の最大

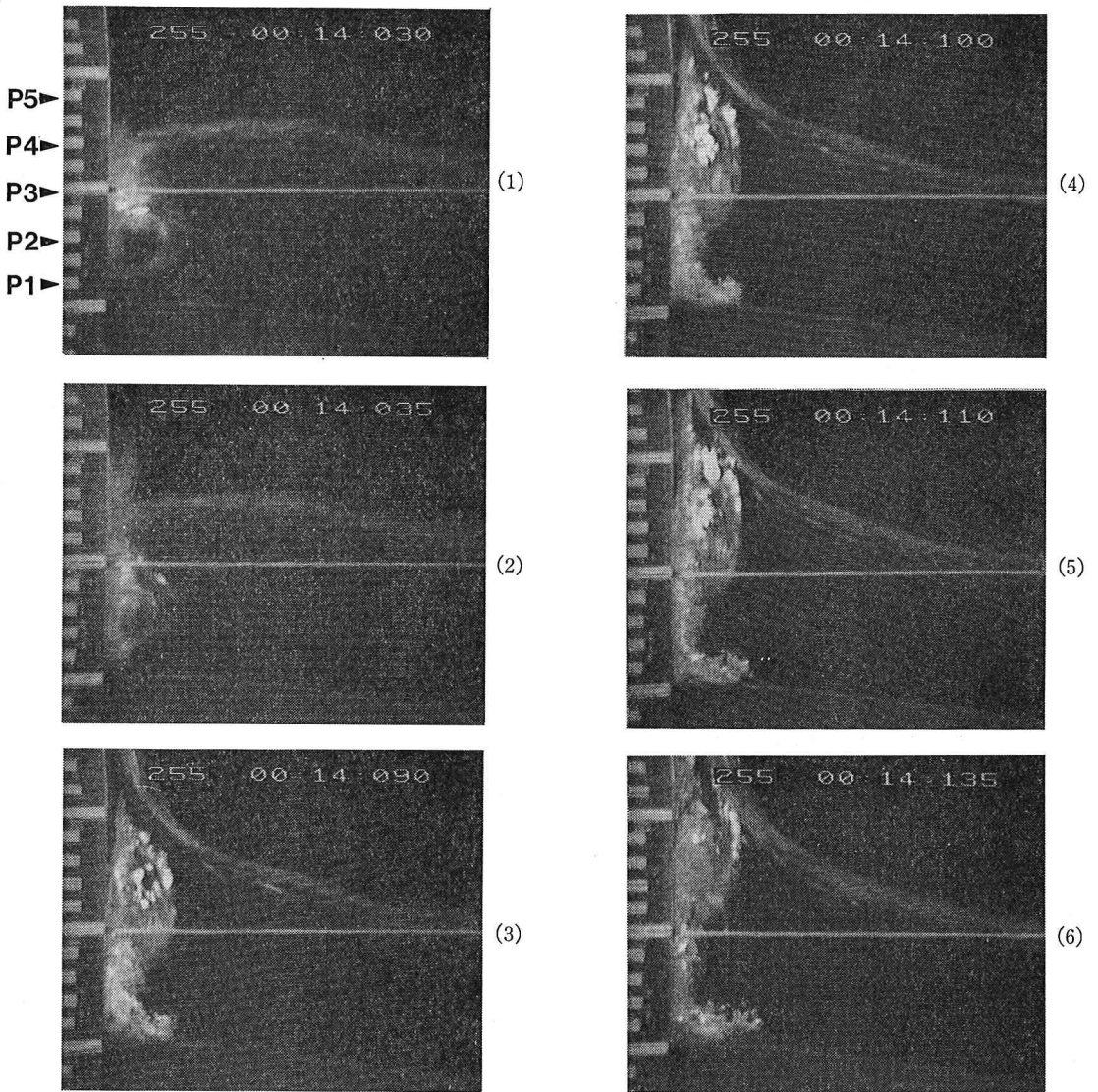


写真-1 減衰振動型衝撃碎波圧の発生状況（連続研究上部数字の下三桁は ms で表示した時間）

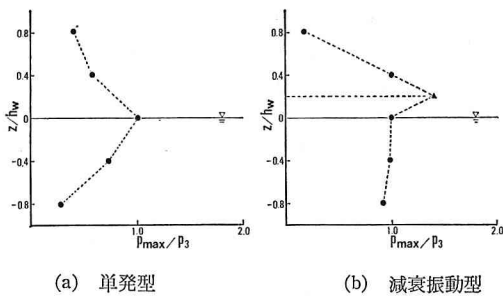


図-3 最大波圧の鉛直分布

発生し、予期した様に空気塊部での波圧はほぼ一定である。壁面への碎波の衝突状況がほぼ二次元的である場合には、静水位置に配置した波圧プローブの出力波形はほとんど同形の変化を示していた（波圧分布図は省略）。

4. 衝撃碎波の算定モデル

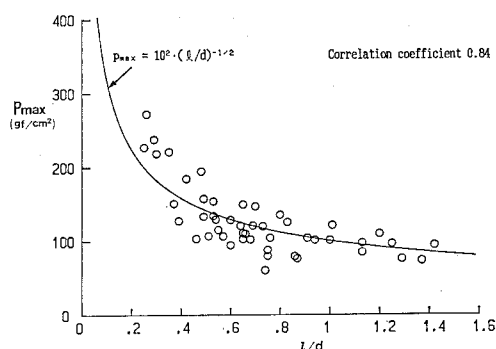
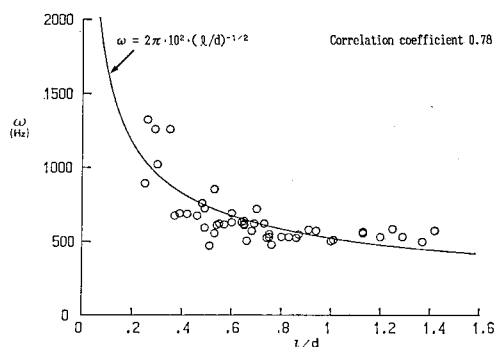
(1) 波圧算定式

衝撃碎波圧の算定モデルには、碎波衝突に加えて封入空気塊の断熱圧縮過程を考慮する必要がある。著者らは(1989)、最大衝撃波圧 $p_{\max}$ と波圧の振動数 ω の算定式として、式(1)と(2)を提案した。

$$p_{\max} = (\rho_w K E_v / l)^{1/2} u_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega = (E_v / \rho_w K l)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

は僅かな空気塊位置に発生している。減衰振動型の場合は、碎波波頂の衝突か所（図中の▲印）で分布の最大が

図-4 $P_{\max} \sim l/d$ の関係図-5 $\omega \sim l/d$ の関係

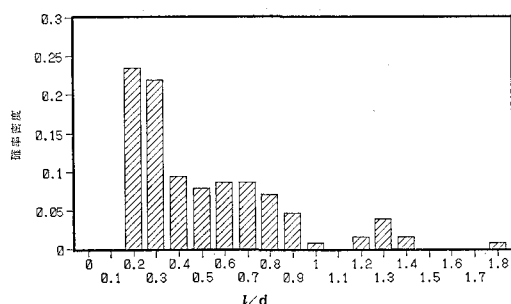
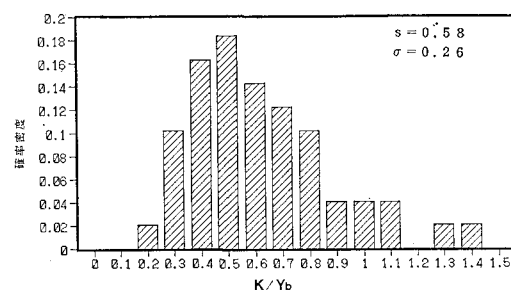
ここで、 ρ_w : 水の密度、 l : 封入空気塊の厚さ、 K : 衝突碎波の仮想質量スケール、 E_b : 空気の断熱圧縮体積弾性率、 u_b : 衝突碎波波面速度。衝撃碎波圧の算定式

(1) を使用するには、 K, l , および u_b を予め見積る必要がある。そこで、封入空気量が多いと衝撃圧が低下することを考慮して、本研究では、封入空気塊の形状係数であり、また衝突直前の碎波波形の変形度を表すパラメータとみなせる l/d を用いて、これら諸量の特性を検討する (d : 直立壁面と封入空気塊の接触長さ)。封入空気塊形状寸法の読み取り精度が高い減衰振動型波圧のビデオ画像データと波圧記録に基づく、図-4 と 5 (図中の実線は最適曲線) の $p_{\max} \sim l/d$ と $\omega \sim l/d$ の関係より、式 (1) と (2) の妥当性が確認される。また、この結果は、 l/d , 特に l の仮想質量スケール K に対する影響度が弱いことを示唆している。

(2) 封入空気塊厚と仮想質量スケール

衝撃碎波圧は極めて変動性の高い現象で、入射波特性が一定であっても、碎波の衝突状況の僅かな違いによって碎波圧特性は大きく変化する。したがって、直接測定が出来ない仮想質量スケール K は、 $p_{\max}$, l および u_b の測定値を用いて式 (1) より推算される K 値の発生確率分布より決めた。

単発型衝撃圧の場合には、封入空気塊厚が非常に薄く

図-6 単発型の l/d の発生確率密度分布図-7 K/Y_b の発生確率密度分布

計測が困難であることから、図-4 の関係を使用して l/d を推定した。図-6 はその発生確率密度分布で、単発型では $0.2 < l/d < 0.3$ の範囲 (空気塊厚さ $l = 0.6 \sim 0.9$ cm), また 図-4 より減衰振動型では $0.3 < l/d$ となる。

これまでの研究では、仮想質量スケールは碎波波高との関係で評価されている (Bagnold, 1939, 林・服部・林, 1958: Partensky, 1988)。しかし、衝撃波圧が衝突直前の諸量、特に直立壁前面水深と衝突波高に強く関係すると思われる。そこで、直立堤基部より波頂衝突位置までの鉛直高さ $Y_b (= h_w + \eta_b)$, h_w : 直立壁前面水深, η_b : 静水面よりの衝突波頂高さ) を仮想質量スケールの基準とした。確度の高いデータに基づく K/Y_b の発生確率密度分布 図-7 より、 K/Y_b の平均値は $s = 0.58$, 分散値は $\sigma = 0.26$, K の変動範囲は $0.36 < K/Y_b < 0.84$ ($2.0 \text{ cm} < K < 7.5 \text{ cm}$) であると推定される。

Y_b は、静水面上の碎波波頂高さ η_b と碎波位置・直立壁間距離とに関係すると思われるが、実験結果より明確な関係は認められなかった。しかし、碎波後の波形変形による波頂高 η_b の減少により、 $0 < l/d < 2$ では $1.4 > Y_b/h_b > 1.0$ (h_b : 碎波水深) の間をほぼ直線的に変化する傾向が認められた。

(3) 衝突波面速度

位相速度に碎波変形速度が加わることから、衝突波面速度 u_b は碎波位置での波速 $C_b [= (g(h_b + \eta_b))^{1/2}]$ より

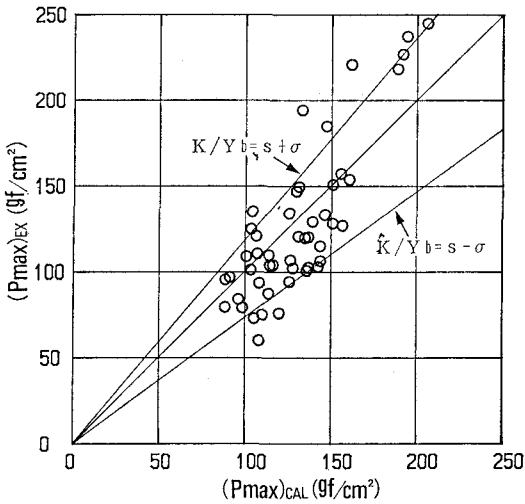


図-8 衝撃砕波圧の計算と実験との比較

若干大きくなり、実験結果によると平均的に $u_b/C_0 \approx 1.1$ 程度であった。

(4) 計算と実験との比較

衝撃圧計算に必要とする諸量に関する以上の検討より、式(1)による衝撃波圧の計算は、

(1) 単発型衝撃圧: $0.2 < l/d < 0.3$

減衰振動型衝撃圧: $0.3 < l/d$

(2) 仮想質量スケール: $K = 0.6(h_w + \eta_c)$

(3) 衝突砕波波面速度: $u_b = 1.1[g(h_b + \eta_b)]^{1/2}$

の関係を使用して行った、計算と実験との比較を図-8に示す。図中の実線は、 K の変動幅を $K = s \pm \sigma$ とした計算波圧の変化範囲を示す。衝突砕波と封入空気塊の形状など、特に l と d の砕波諸量との関係付けはまだ不十分であるが、計算と実験の一致の程度は良好であると認められる。

5. 結 論

衝撃砕波圧の発生機構は、直立壁と衝突砕波波面間の

封入空気塊の断熱圧縮であり、圧縮空気塊の外部離脱は関係しないことが確認された。従って、衝撃砕波圧の算定モデルには、砕波の衝突と同時に空気塊の圧縮過程を取り入れる必要があり、著者らは、衝撃砕波圧算定式(1)を提案した。計算に使用する諸量は衝突直前の砕波特性に大きく依存するため、実験または数値計算に基づく諸量を入力データとする。実験結果よりえられた前節(4)で与えられる関係を使用した計算結果は実験と良好な一致を示し、本研究で提案した算定式の妥当性が確認された。

衝撃波圧振動の減衰は、圧縮過程で発生する封入空気塊の小気泡化とその運動に伴うエネルギー逸散に原因すると考えられるが、その解明は今後の研究課題である。

謝辞 本研究を行うに当たり、東京大学工学部磯部雅彦助教授より貴重なご意見を頂いた。また、実験とデータ整理には、当時中央大学海岸研究室学部学生の嶋田拓治・白水篤両君の協力をえた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究C (No. 01550409) の補助により行った。

参 考 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎 (1989): 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, Vol. 36, pp. 579~583.
- 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉 (1958): 砕波の波圧と力積, 第5回海岸工学講演集, pp. 21~27.
- 和田 明・橋本 宏・藤森研一 (1965): 波圧算定式について, 土木学会誌, Vol. 50, No. 11, pp. 44~55.
- Bagnold, R. A. (1939): Interin Report on Wave Research, Jour. The Inst. of Civil Eng., Vol. 12, No. 7, pp. 202~226.
- Chan, E. S. and W. K. Melville (1988): Deep-water plunging wave pressures on a vertical plane wall, Proc. Roy. London A, 417, pp. 95~131.
- Mitsuyasu, H. (1966): Shock pressure of breaking waves, Proc. 10th ICCE, pp. 268~283.
- Partenscky, H. (1988): Dynamic forces due to waves breaking at vertical coastal structures, Proc. 20th ICCE, pp. 2505~2518.