

衝撃性砕波圧の発生・伝搬機構に関する実験的研究

服部 昌太郎*・由井 孝昌**

1. 緒 言

直立壁に作用する衝撃性砕波圧の発生は、衝突波面と壁面間に封入される小空気塊の断熱圧縮過程が、その主要因とする Bagnold (1937) モデルが提案され、合田・原中 (1967)、光易 (1959)、荒見・服部 (1990) の実験によりその妥当性が確認されている。しかし、(1) 空気封入が発生する砕波の衝突条件、(2) 静水面近傍で発生する最大衝撃波圧の水底方向への急減機構、(3) 砕波波圧の力積と砕波衝突条件との関係など、衝撃波力のモデル化に際して必要となるこれらの問題の検討は十分になされていない。本報は、上記の事柄に着目して行った実験の報告である。

2. 実験装置と測定・実験方法

2.1 実験装置

両面ガラス張り二次元波動水槽 (0.30 m×0.55 m×20 m) 内に設置した 1/20 勾配斜面上に、直立壁体を固定設置して実験を行った (図-1)。実験の再現性を高めるため、実験波は反射吸収式造波装置 (フラップ型) に規則波発生アナログ信号を送り造波した。入射波諸量の測定は、直立壁からの反射の影響を受けない波群を対象として、一様水深部に設置した容量式波高計を用いて行った。

2.2 波圧と砕波衝突状況の測定方法

波圧は、直立壁中心線上の六測点に設置した半導体型波圧計 (直径: 10 mm, 容量: 100 gf/cm² と 200 gf/cm², 応答周波数: 9.6 kHz) で検出し、増幅後サンプリング周波数 5 kHz で 2 台のデジタル記録計 (DR-2000) に取

録し、造波開始後の 3~6 波に対して、波圧解析を行った。波圧測定と同時に、砕波の衝突状況と封入空気塊の挙動などを高速ビデオ (200 コマ/s) で撮影記録し、砕波諸量と封入空気塊の形状は、水槽ガラス面の 1 cm 正方格子により、ビデオ静止画像から読み取った。波圧測定記録とビデオ画像間の同期は、ビデオ画面上の静水面での波圧のリアルタイム波形によって行った (誤差 0.1 ms 以下)。(詳細は由井・服部, 1992)

3. 空気封入の発生条件

重複波圧より衝撃砕波波圧への移行過程で、衝突水面の上昇加速度により衝撃性波圧を発生する Flip-Through 現象が現れることが、Cooker と Peregrine (1991) の数値解析と著者らの実験 (1992) により確認された。

入射波高が増大し衝突波面の波峰部に鉛直面が現れると、衝突時に僅かな空気泡が連行され、最大衝撃性波圧が急増する (図-2: $p_{\max}/\rho gh_d \sim H_F/h_d$)。図-2 の記号は

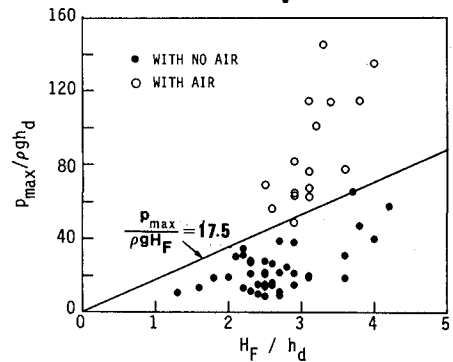


図-2 $p_{\max}/\rho gh_d \sim H_F/h_d$

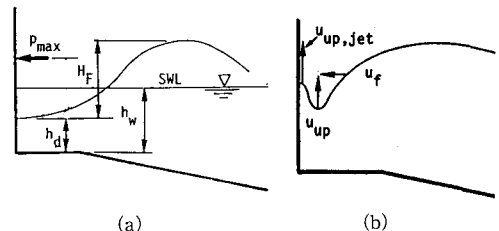


図-3 Flip-Through 条件の記号定義

図-1 実験装置の配置 (単位: m)

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工修 石川島播磨重工業(株)

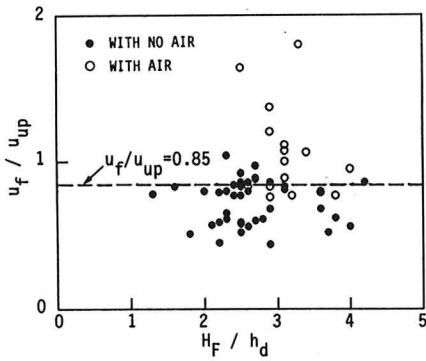
図-4 $u_f/u_{up} \sim H_F/h_d$ の関係

図-3で定義され、 p_{max} は最大波圧、 H_F は衝突前の最大波高、 h_d は直立壁前面での波底水深である。

図-2より、衝撃性碎波圧の発生は、波面と壁面間での空気塊の封入をともしう Flip-Through 型衝突の発生条件により規定することができる。Kirkgöz (1990) は、空気泡封入がなく鉛直波面が直立壁に衝突する場合に、最大衝撃波圧が発生することを報告している。しかし、彼の測定最大波圧は $p_{max}/\rho g H_b = 15$ であり、図-2の実線で示す空気塊封入限界の $p_{max}/\rho g H_F = 17.5$ とほぼ同程度である。

空気泡封入の発生は、衝突時の直立壁面での高速上昇流の速度 $u_{jet,up}$ と波面の前進速度 u_f との関係で検討すべきである。しかし、 $u_{jet,up}$ の測定が困難であるため、 $u_{jet,up}$ に代えて壁面直前の波底水面の上昇速度 u_{up} に着目する(図-3(b))。図-4の $u_f/u_{up} \sim H_F/h_d$ の関係より、空気泡封入の発生限界として $u_f/u_{up} = 0.85$ が認められる。

4. 衝撃波圧の伝搬

図-5は、単発型衝撃波圧発生時の最大波圧の鉛直分布 ($p_{max}/\rho g H_b \sim z/h_w$, h_w は直立壁前面静水深) を示したもので、図中には波圧の変動幅と平均値 (●印) が示さ

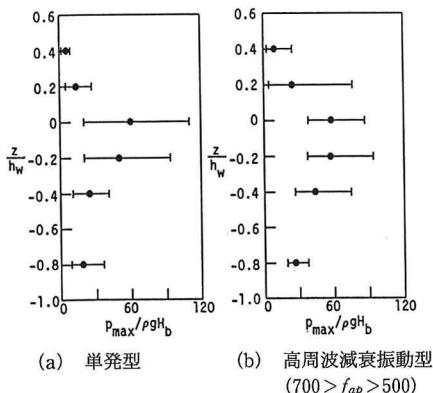
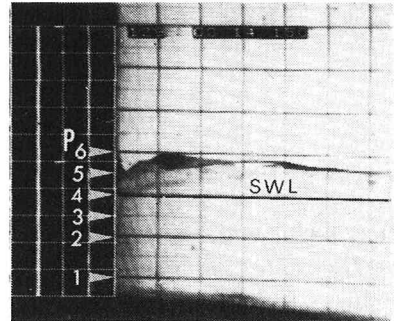


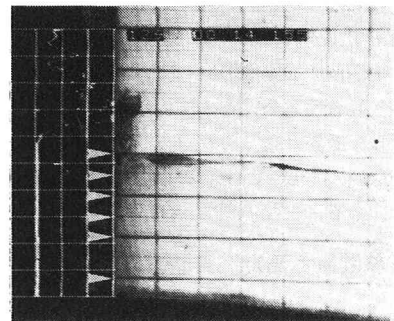
図-5 最大衝撃波圧の鉛直分布

れている。これまでの実験結果 (Chan・Melville : 1988, Kirkgöz : 1990) と同様に、静水面近傍の波面衝突点で発生した最高波圧が、水深方向に急激に低下している。

写真-1と図-6は、小空気塊を封入して発生する単発



(a) 衝突直前



(b) 衝突直後

写真-1 単発型衝撃波圧発生時の衝突波形

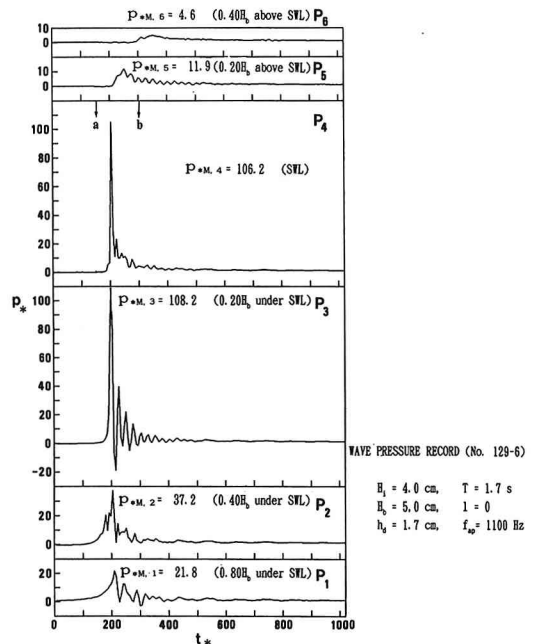


図-6 単発型衝撃波圧の波圧記録

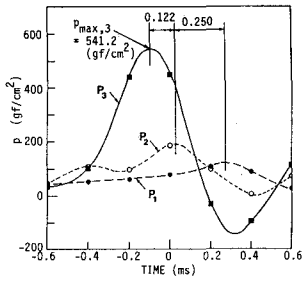


図-7 拡大波圧記録 (図-3)

型衝撃最大波圧発生直前後 (図-3 中の太矢印) の碎波衝突状況と、無次元波圧記録 $p^* (= p / \rho g H_b) \sim t^* (= t c_s / H_b)$: H_b は碎波波高, $c_s = 1500$ m/s は水中音速) である。静水面下 1 cm の測点 P_3 での最大波圧が、静水面位置の P_4 より $t^* = 0.042$ (0.14 ms) 先行して発生していること事から、波面の衝突地点は静水面直下であると判定される。波圧記録 (図-6) では、測点 P_1 と P_2 での衝撃波圧は P_3 とほぼ同時に発生している。一方、写真-1 に見られるように、静水面下方の P_1 と P_2 の 2 測点は水中にあり、測点への衝突流速は静水面付近に較べて小さい (トレイサーにより確認)。図-7 は、3 測点 P_3 , P_2 , P_1 の最大波圧発生時近傍の波圧記録 (有次元) を拡大したもので、この図より各測点間の最大波圧発生時間差を求め、衝撃波圧の伝搬速度 c_p を算定した結果が、表-1 に示される。

小気泡を混入する水中内を伝搬する圧縮波 (音波) の速度は、気泡の存在により急激に減少する事が知られている。Wallis (1969) は、空気混入率 $\alpha > 10^{-3}$ での水中音速算定理論式として、

$$c_s := \frac{C_a}{\left[\frac{\rho_f}{\rho_g} \alpha (1 - \alpha) \right]^{1/2}}, \dots\dots\dots (1)$$

表-1 衝撃波圧の発生時間差と伝搬速度

測点	$P_3 \rightarrow P_2$	$P_3 \rightarrow P_1$	$P_2 \rightarrow P_1$
測点間距離	1.0 cm	3.0 cm	2.0 cm
発生時間差	0.122 ms	0.372 ms	0.250 ms
伝搬速度 c_p	82.0 m/s	80.0 m/s	81.6 m/s

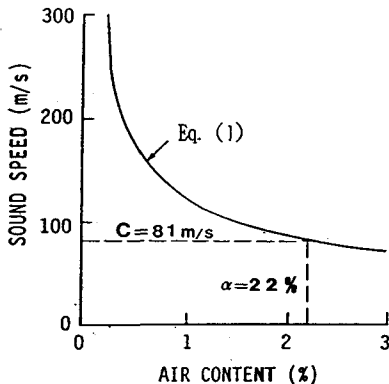


図-8 水中音速と空気混入率 (Wallis, 1968)

をえた (図-8)。ここで $c_a (= 341$ m/s) は空気中の音速, ρ_a と ρ_w は空気と水の密度 ($\rho_a / \rho_w = 0.0012$) である。

測定衝撃波速 81 m/s に対する空気混入率を式 (1) より算定すると $\alpha = 2.2\%$ をうる。以上と同様のデータ解析を行った結果、衝撃波圧の伝搬速度として $c_p = 76$ m/s ~ 125 m/s, 式 (1) による空気混入率 $\alpha = 2.5\% \sim 1.0\%$ をえた。碎波衝突による封入空気塊の小気泡化を考慮すると、空気混入率の算定値は妥当であると考えられる。したがって、静水面付近に発生した衝撃波圧が水深方向に水中を伝搬し、静水面下方部の壁面に衝撃波圧が発生することが明かとなった (谷本ら, 1983)。合田・原中 (1967) と同様に、直立壁前方への衝撃波圧の伝搬実験を行った結果、衝撃圧の伝搬速度として $c_p = 50$ m/s ~ 220 m/s をえた。以上の実験結果から、図-5 に見られる静水面下方での最大衝撃波圧の急減は、空気混入水中の伝搬過程でのエネルギー逸散と方向分散が主要因であることが指摘される。

5. 衝撃波圧の力積

衝撃性波圧の力積に関して、(1) 最大波圧に較べて変動性が少なく、入射波の運動量に対してほぼ一定である (Bagnold, 1939; Denny, 1951; Ross, 1955; 永井,

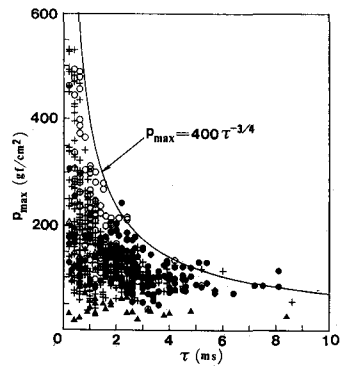


図-9 $p_{max} \sim \tau$ の関係

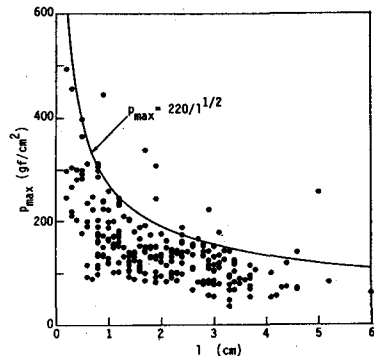


図-10 $p_{max} \sim l$ の関係

1958; 光易, 1959; Weggel・Maxwell, 1970), (2) 直立壁との衝突条件により変化する (Witte, 1988), (3) 構造物変形は力積に比例する (林・服部・林, 1958) など, これまで指摘されている。

図-9 と 10 は, 実験結果から $p_{\max} \sim \tau$ と $p_{\max} \sim l$ の関係を示したもので, τ は衝撃波圧の立ち上がり時間, l は封入空気塊厚である。図-9 の記号は, $\blacktriangle$ と $\triangle$ は空気連行有り無しとの Flip-Through 型, $+$ は単発型, $\circ$ と $\bullet$ は振動数 f_{ap} が 120 Hz 以上と以下の減衰振動型の場合を示す。

図-9 と 10 には, 実験結果に対する包絡線

$$p_{\max} = 400 \cdot \tau^{-3/4}, \dots\dots\dots (2)$$

$$p_{\max} = 220 \cdot l^{-1/2} \dots\dots\dots (3)$$

が, 実曲線で示されている。この二つの実験結果から, 封入空気量すなわち空気塊厚の増大と共に, $p_{\max}$ と τ は低減すること分かる。衝突エネルギーの一部が衝撃圧による封入空気塊の圧縮に使われるため, 碎波の衝突条件で衝撃波圧の力積が変化すると考えられる。この考えに基づいて, 図-9 の実験結果を衝撃波圧特性 (衝突条件) 別に検討した結果,

$$p_{\max} = 320 \cdot \tau^{-2/3} \text{ (単発型)} \dots\dots\dots (4)$$

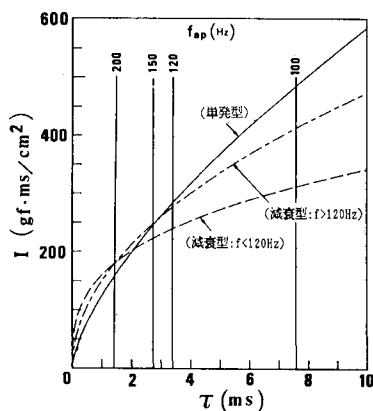


図-11 衝撃波圧の力積 I と τ

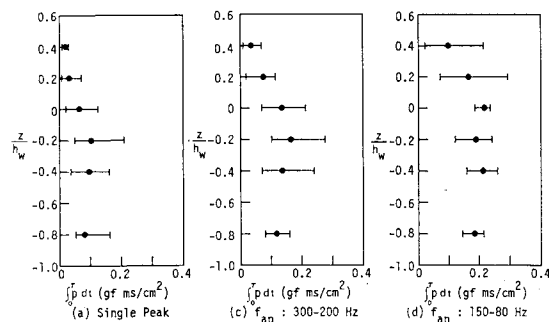


図-12 衝撃圧力積の鉛直分布

$$p_{\max} = 300 \cdot \tau^{-1/2} \text{ (減衰型: } f > 120 \text{ Hz)} \dots\dots (5)$$

$$p_{\max} = 240 \cdot \tau^{-1/3} \text{ (減衰型: } f < 120 \text{ Hz)} \dots\dots (6)$$

をえた。Witte (1988) は, 単発型に対して $p_{\max} \sim \tau^{-0.61}$ の関係を示している。衝撃波圧の力積を $I = p_{\max} \cdot \tau/2$ で近似し, 式 (4) ~ (6) を用いて I と τ との関係を示したものが図-11 で, 図中には $f_{ap} = 220 \cdot l^{-1/2}$ の関係 (f_{ap} : 圧力振動数; 実験結果は紙数の関係上割愛) に基づいて, 減衰振動型衝撃圧の発生領域が, f_{ap} で示されている。

図-12 に示す衝撃波圧の力積の鉛直分布に見られるように, 最大波圧が極めて大きい単発型衝撃圧に較べて, 空気塊を封入し衝撃圧の立ち上がり時間が長い減衰型衝撃圧の力積が大きくなるが, 図-11 によって説明付けられる。以上の実験結果より, 減衰型衝撃波圧条件を構造物の設計に組み入れる必要性和その理由が明らかとなった。

6. 最大衝撃波圧の変動性

衝撃碎波圧特性に関して, これまで数多くの実験結果が報告されているが, 波圧特性に関する統一的な見解はまだえられていない。その理由として, (1) 碎波衝突現象, (2) 実験装置と測定法, および (3) データ解析が原因となる衝撃波圧の変動性が挙げられる。

碎波現象に加えて, 直立壁の反射により衝突碎波波形が一波ごとに変化する。このため, 衝突時に封入される空気量と空気塊形状 (気泡の分布), 碎波衝突の打ち上げ水流による圧縮空気塊の離脱過程の違いなどにより, 図-5 と 7 に見られるような, 最大波圧の鉛直分布と衝撃波圧波形に大きな変動が生ずる。

Cooker と Peregrine (1990) によると, Flip-Through 衝撃波圧の最大波圧の発生範囲は波頂付近の $0.1h_d$ (本実験の場合 5 mm) と極めて狭いため, 衝突碎波波形の僅かな変動によって, 最大波圧の発生位置が変わる結果となる。

波圧測定とデータ処理がもたらす測定衝撃波圧変動の主因として, 波圧計の寸法と配置間隔, 測定出力のサンプリング周波数が挙げられる。本実験では, 直径 1.0 cm の波圧計を静水面付近では鉛直方向 1.0 cm 間隔に設置しており, 最大波圧発生範囲に較べていずれも二倍程度大きい。Oumeraci (1992) は, 衝撃波圧出力のサンプリング周波数を, 少なくとも 5 KHz 以上にする必要があることを指摘している。しかし図-5 の拡大波圧記録に見られるように, 単発型衝撃波圧に対してはサンプリング周波数 5 KHz でも十分とは言えない (データ解析では B-スプライン関数による補間を行った)。

本実験でも, 上記の実験と測定に関係する問題点は十分に克服されていないが, 衝撃波圧の変動特性に対して若干の考察を以下に試みる。

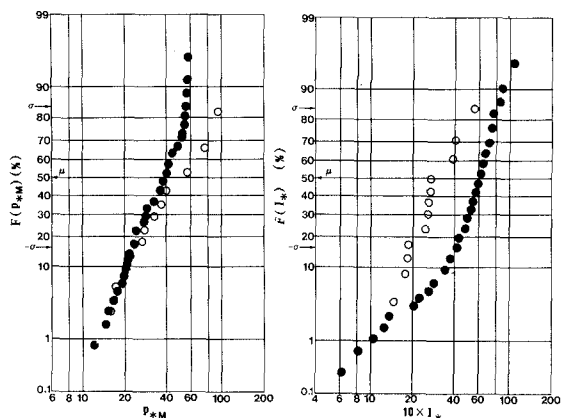


図-13 最大衝撃波圧と力積の発生確率分布
(○：単発型衝撃圧 ●：減衰型衝撃圧)

図-13は、単発型と封入空気塊厚が $l \geq 1$ cm の減衰振動型の最大衝撃波圧 p_{*M} と力積 $I_*(= \int_0^{\tau} p dt / (\rho g H_b^2 / c_s))$ の発生確率分布を、対数正規確率紙にプロットしたものである。Führbötter (1969), Witte (1988) らと同様に、本実験でも最大衝撃波圧と力積の発生確率は、ほぼ対数正規分布に従うことが確認された。空気塊が封入されると、最大波圧が低下し、波圧変動も減少する傾向が認められる。また、これまで衝撃波圧の算定に力積モデルが採用される根拠となっていた力積の変動性が最大波圧に較べて低下している。

7. 結 論

本研究の結果より明らかにされた主たる事柄は、以下の様である。

(1) Flip-Through 波圧より単発性衝撃碎波圧への移行条件として、衝突最大波高 $2 < H_F / h_d < 4$ 、最大波圧 $p_{\max} / \rho g H_F = 17.5$ と衝突水面の速度比 $u_f / u_{\text{up}} \leq 0.85$ をえた。

(2) 壁体の水面下方部に作用する衝撃波圧は、碎波波面の衝突点に作用する衝撃波圧の伝搬によるものである。また、水底方向への最大波圧の急激な低減は、封入空気塊の分裂と崩壊に加えて、衝撃波の方向分散と小気泡を混入する水中の伝搬過程でのエネルギー逸散による。

(3) 衝撃碎波圧の力積は碎波の衝突条件に支配され、封入空気量の増加と共に力積は増大する。

(4) 最大衝撃波圧と力積の発生確率は、対数正規分布に従う。

上記の(2)と(3)は、これまでの知見とは異なるものである。今後、より詳細な検討を行う必要はあるが、

耐波構造物設計に考慮すべき新たな問題が、本研究により提示された。

謝辞：本研究での実験とデータ解析には、中央大学大学院学生酒井博之君、および学部学生の小泉 博(東洋建設)・山室 明(三重県)の両君の協力を得た。また、本研究の一部は文部省科学研究費(重点領域 03201138, 代表者 服部昌太郎)によって行った。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎(1990): 衝撃碎波圧の算定モデル, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 629-633.
- 合田良実・原中祐人(1967): 衝撃碎波圧に関する一実験, 港湾技研資料, No. 32, pp. 3-18.
- 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊(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. 317-322.
- 永井荘七郎(1958): 防波堤に働く碎波の圧力に関する研究, 第5回海岸工学講演会講演集, pp. 29-39.
- 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉(1958): 碎波の波圧と力積, 第5回海岸工学講演集, pp. 21-27.
- 光易 恒(1959): 直立壁に働く全波力について, 第6回海岸工学講演会講演集, pp. 107-113.
- 光易 恒(1965): 碎波による衝撃的波圧(1), 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 106-113.
- 由井孝昌・服部昌太郎(1992): 衝撃碎波圧におよぼす直立壁体の変形効果, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 681-685.
- Bagnold, R. A. (1939): Interim report on wave pressure research, Jour. of ICE, Vol. 12, pp. 202-225.
- Chan, E. S. and W. K. Melville (1988): Deep-water plunging wave pressures on a vertical plane wall, Proc. of Royal Soc. London, A417, pp. 95-131.
- Cooker, M. J. and D. H. Peregrine (1991): Wave breaking and wave impact pressures, Developments in Coastal Eng., Univ. of Bristol, pp. 47-64.
- Denny, D. F. (1951): Further experiments on wave pressures, Jour. of ICE, Vol. 35, pp. 330-345.
- Führbötter, A. (1969): Laboratory investigation of impact forces, Proc. Symp. Research on Wave Action, Tech. Univ. Delft, Paper No. 6.
- Kirkgöz, M. S. (1982): Shock pressure of breaking waves on vertical walls, Proc. ASCE, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div., No. WW1, pp. 81-95.
- Oumeraci, H. P. (1992): Private Communication.
- Ross, C. W. (1955): Laboratory study of shock pressures of beaking waves, BEB, Tech. Memo. 59, 22 p.
- Wallis, G. B. (1969): One-dimensional Two-phase Flow, McGraw-Hill, pp. 141-152.
- Weggel, J. R. and W. H. C. Maxwell (1970): Experimental study of breaking wave pressures, Proc. Offshore Tech. Conf., Texas, pp. II-175-188.
- Witte, H. H. (1988): Wave-induced impact loading in deterministic and stochastic reflection, Mitteilungen, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Tech. Univ. Braunschweig, 102, pp. 1-227. (in German)