

衝撃性砕波圧の発生機構に関する実験的研究

荒見 敦史*・服部昌太郎**

1. はじめに

直立堤体に働く衝撃砕波圧は非常に大きく、その作用時間が極めて短いことが特徴である。この波圧の発生機構として、(1) 直立壁と砕波波面とはさまれた空気塊の断熱圧縮説 (Bagnold, 1939)。(2) 砕波の壁面衝突による衝撃説 (永井, 1985)。(3) 壁体の弾性と流体の圧縮性を考慮した弾性波説 (Kamel, 1970) などが提案されている。これら諸説を検証するためこれまで数多くの実験的研究がなされた。

近年、被災報告が比較的頻繁に聞かれる直立防波構造物は勿論のこと、各種の透過式直立防波堤・護岸に対する終局・使用両限界荷重として、従来と異なった立場から砕波圧のより適切な算定法の開発が望まれている。この要請に応えるため、衝撃性砕波圧の発生機構を実験的に解明することを目的として、本研究を行っている。

2. 実験装置と測定方法

反射吸収式造波装置を備える両面ガラス張り二次元波動水槽 (0.30m×0.55m×20m) 内に設置した1/20一様勾配斜面上に、直立堤体を固定して実験を行った。衝撃砕波圧を安定して発生させるため、堤体の前面に1/8勾配斜面を置いた (図-1 (a))。堤体背面からレーザー照明を行い、砕波の衝突状況と堤体と砕波波面間にはさまれる空気塊の変形挙動を高速ビデオ撮影 (毎秒 200 こま) するため、模型直立堤体は 25 mm 厚の透明プラスチック板で作製した。図-1 (b) に示す 5 ケ所の測点に、半導体圧力センサー (直径 10 mm, 容量 200 gf/cm², 応答周波数 4600 Hz) を配置した。波圧測定出力は動歪アンプ (応答周波数 5000 Hz) で増幅し、サンプリング周波数 2000 Hz でデジタル記録装置 (DR-2000) に記録後電算処理を行った。

直立堤体からの反射と衝突水塊の落下による砕波形状の乱れの影響を避けるため、造波開始後 2～4 波までの入射波による波圧を解析の対象とした。進行波としての

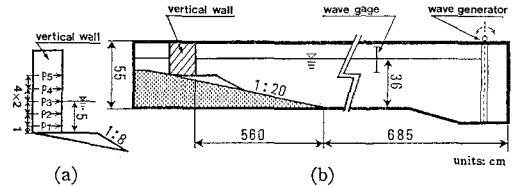


図-1 実験装置の概略図

波高計測は一様水深部 ($h=36$ cm) で容量式波高計で、また堤体衝突直前の砕波波高 (H_b)、砕波波面速度 (u_b) および封入空気塊寸法は29インチビデオ画面より読み取った。実験条件は、入射波高 7～9 cm, 周期 1.7 秒, 堤体前面水深 5.0 cm である。

3. 波圧波形と衝突砕波状況

これまで直立堤体に作用する波圧と衝突砕波波形との同時記録により、衝撃砕波圧の発生機構が検討されてきた (林・服部, 1957; 永井, 1958; 堀川・野口, 1970) が、使用した測定機器性能の制約により十分な解明には到らなかった。そこで、本実験で測得された代表的な波圧波形とその発生状況を示す同時記録の連続画像により、波圧の発生機構とその特徴を以下に説明する。

(1) 単発型衝撃波圧 (図-2 と写真-1)

先行波の影響が殆ど見られない砕波波面に取り込まれた僅かな空気塊が、堤体衝突の瞬間に離脱する場合に発生する、代表的な砕波の衝撃波圧波形である。波圧波形は鋭く立ち上がり、最大波圧は $p_{max}=374$ gf/cm² に達し、作用時間は $\tau=0.5$ ms と極めて短い。衝突水塊は splash となって上方に打ち上げられるが、この時点では衝撃波圧は既に消滅し、堤体からの反射波が形成される時点から、いわゆる腰掛け部波圧が発生する。衝撃砕波圧の発生機構は、砕波の運動量の急速変化に起因するとした合田 (1967) の考えに近いと言える。

本実験での単発型衝撃波圧の発生頻度は、昨年度の実験 (荒見・服部, 1988) に較べて低いことから、堤体前面の形状がその発生に関係していると思われる。

(2) 減衰振動型衝撃波圧 (図-3 と 4, 写真-2 と 3)

砕波波頂部が巻き込み空気塊を封入して堤体に衝突す

* 学生会員 中央大学大学院 土木工学専攻科

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

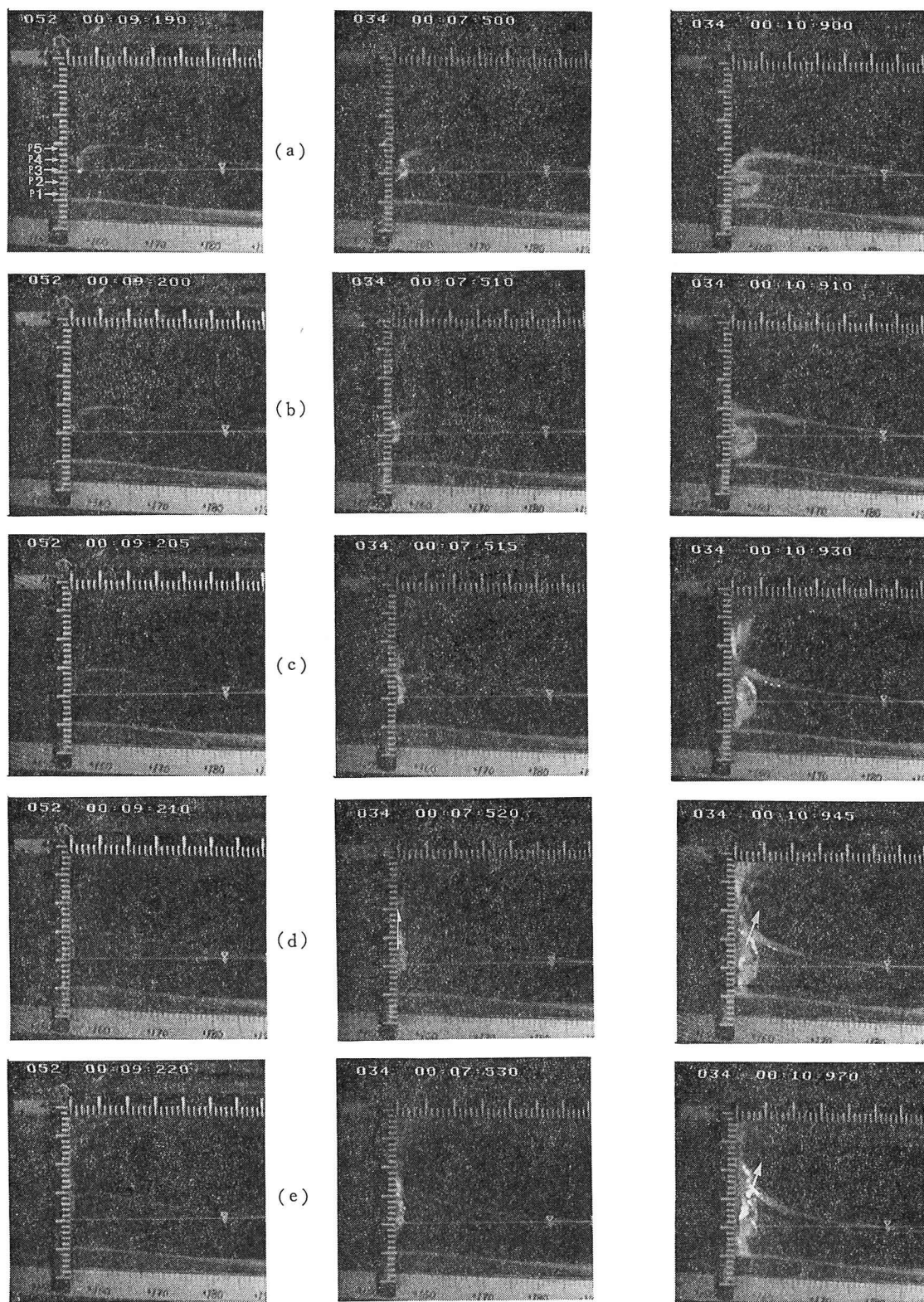


写真-1 衝撃砕波圧発生状況
(単発型衝撃波圧の場合)

写真-2 衝撃砕波圧発生状況
(減衰振動 A 型の場合)

写真-3 衝撃砕波圧発生状況
(減衰振動 B 型の場合)

(連続写真上部数字の下三桁が ms で表示した時間である)。

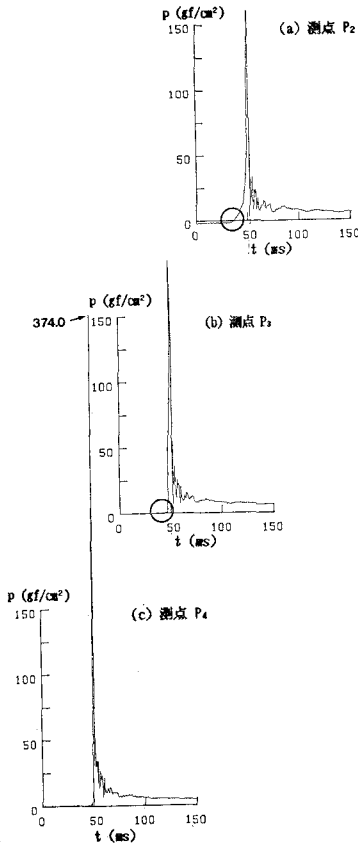


図-2 単発型衝撃波圧出力

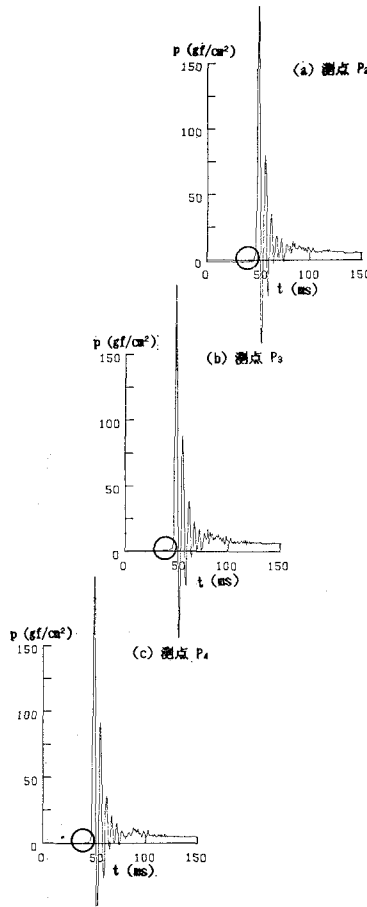


図-3 減衰振動 A 型衝撃波圧出力

(波圧波形は、測点 P_3 での波圧が最大となった時刻を $t=50$ ms として画かれている)。

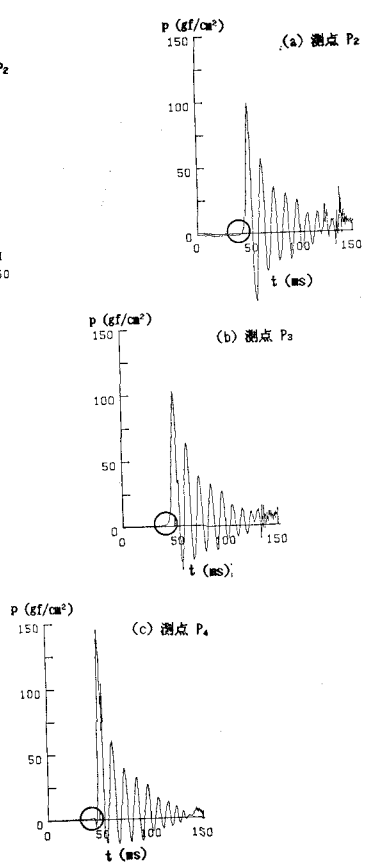


図-4 減衰振動 B 型衝撃波圧出力

る場合には、第一波の衝撃波圧変動が直線的より正弦波的な傾向が強まり、減衰振動する波圧波形となる。

この様な波圧波形の発生には、堤体・波面間の封入空気塊の存在が不可欠で(合田・原中, 1967), 空気塊の断熱圧縮過程で空気の離脱が発生するか否かによって、波圧変動の周波数が変化する。変動周波数の高い波圧波形 A 型 (120~260 Hz) は、図-5 (a) の模式図に示すように砕波波頂の堤体面への衝突角度が比較的浅く空気塊の閉じ込みが不十分で、衝突直後の圧縮過程で封入空気が堤体面に沿って水と共に splash となって離脱する(写真-2 (c))。この時点で波圧が急減する傾向が認められた。一方、変動周波数の低い B 型 (80~110 Hz) の発生は、衝突波頂の下方への巻き込みにより空気塊は殆ど封入され(図-5 (b)), 圧縮過程で上方に移動して、波面と空気塊間の薄い部分から空気の離脱が発生している(写真-3 (d), (e) の矢印)。

図-6 は減衰振動時の波圧変動周期 T_s の変化で、変

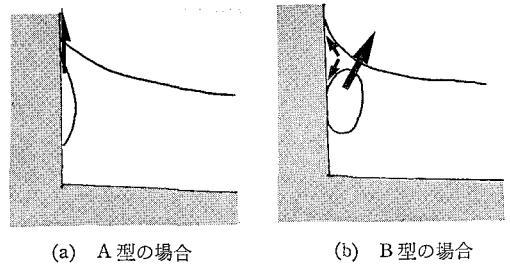
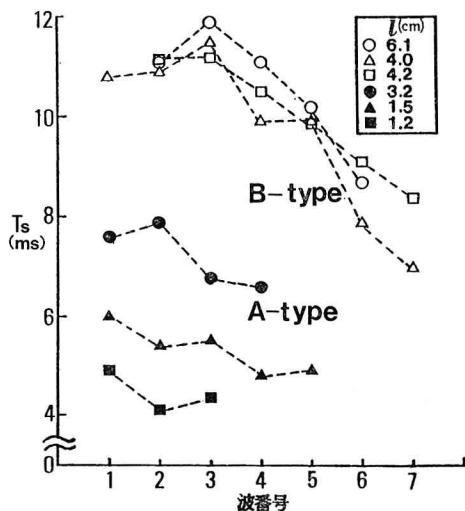


図-5 封入空気塊の離脱状況模式図

動周期は増減しながら時間経過と共に減少している。空気塊の残留度が高い B 型の波圧の減衰振動は、A 型に比べて若干長く持続する傾向がある。また、 T_s と第 1 波の衝撃波圧の継続時間 τ_s との間には密接な関係があり(合田・原中, 1967), T_s の変化は最大衝撃圧に続く減衰振動波圧が封入空気塊の寸法・形状だけでなく、圧縮過程での空気塊形状の変化や小気泡の発生に関係している

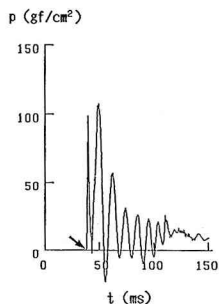
と考えられる。以上のことから、減衰振動型波圧の発生機構は封入空気塊の断熱圧縮振動(林・服部, 1957)で, Mitsuyasu(1966)が提案したモデルはA型の場合に相当する。



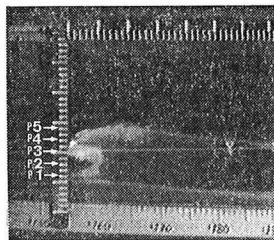
図—6 波圧変動周波数の経時変化

(3) ふた山型衝撃波圧 (図—7, 写真—4)

先行波の影響を受けた碎波波面が堤体に衝突する場合に合田・原中と同様の波圧波形が発生した。図—7 と写真—4 は、ふた山型衝撃波圧の発生因を示す特徴的な測定記録で、静水面位置に取り付けられた圧力センサー P_3 に直接碎波波頂が衝突した場合の、波形と衝突瞬間の状況写真である。この波圧波形の特徴は、第一波の波圧が瞬間的に立ち上がり(図—7 中の矢印)、他の波圧波



図—7 波頂衝突による波圧波形 (P_3)



写真—4 波頂衝突瞬間の状況

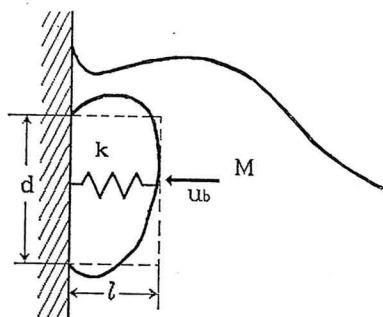
形に見られるような(図—2~4 中の円印)水位上昇による緩やかな圧力上昇が記録されないことである。図—7 の最初の衝撃波圧形状は図—2 と殆ど同様の形状を示し、波頂衝突波圧に続いて減衰型波圧が発生している。以上のことから、少なくとも減衰振動型衝撃波圧発生の

場合には、碎波波頂の衝突ヶ所付近ではふた山型衝撃波圧が発生していると言える。

ビデオ画像から認められる衝突時の碎波面形状は、先行波の堤体反射、落下水塊などの影響を受けて、一波毎の碎波位置、碎波波頂の衝突角度、波面の湾曲度などが微妙に変動するため、衝撃波圧も変動する。衝撃性碎波圧が消滅した後でも、衝突波の運動量の相当部分が残存して(Ross, 1955) splash 状の打ち上げが発生しているが、これまで指摘されているように、衝撃碎波圧の力積はほぼ一定となることが本実験でも認められた。

4. 単純化したモデルによる理論的考察

減衰振動型衝撃波圧の発生は封入空気塊の存在とその振動によることが確認されたことから、空気塊形状を堤体との接触高さ d 、厚さ B 、幅 l の長方体に近似し、その断熱圧縮過程を見かけのバネ定数を用いて簡単な考察を試みる(図—8)。



図—8 記号説明

空気塊のバネ定数 k は、断熱圧縮の体積弾性率 $E_v = \gamma p_{atm}$, $p_{atm} (= 1034 \text{ gf/cm}^2)$: 大気圧, $\gamma (= 1.4)$: 断熱係数)を用いると、

$$k = (Bd/l) E_v \dots \dots \dots (1)$$

と表される。碎波衝突時の運動エネルギーが最大波力発生時での歪エネルギーとして空気塊に蓄えられる(Bagnold, 1939)とすると、平均最大碎波波圧 p_{max} は、

$$p_{max} = F_{max}/Bd = (\sqrt{kM/Bd}) u_b \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 M は波力発生に寄与する碎波の衝突水塊の質量で、仮想水塊長を K とすると $M = \rho_w K B d$ (ρ_w : 水の密度)である。したがって、式(1)と(2)から

$$p_{max} = \sqrt{\rho_w K E_v / l} \cdot u_b \dots \dots \dots (3)$$

また、衝撃波圧の変動周波数 ω は、

$$\omega = \sqrt{k/M} = \sqrt{E_v / \rho_w K l} \dots \dots \dots (4)$$

となる。いま、 $l = K = 5.0 \text{ cm}$ として p_{max} と ω を式(3)と(4)より試算すると、 $p_{max} = 120 \text{ gf/cm}^2$ と $\omega = 241 \text{ Hz}$ となり、減衰振動型衝撃波圧の測定結果にはば

近い値となる。減衰振動型波圧の発生機構は、封入空気塊の断熱圧縮振動が主要因であることが確かめられた。

5. 実験結果の解析

図-9 は、静水面とその上下 2 cm の波圧測定点 (P_2 , P_3 , P_4) の最大平均無次元波圧 p_{max}/p_d ($p_d = \rho_w u_b^2/2$) と衝突瞬間の封入空気塊形状係数 l/d との関係を示したものである。これまで指摘されているように、砕波面が巻き込む空気塊が大きくなるにつれて、堤体に作用する衝撃波圧が低減することが認められる。

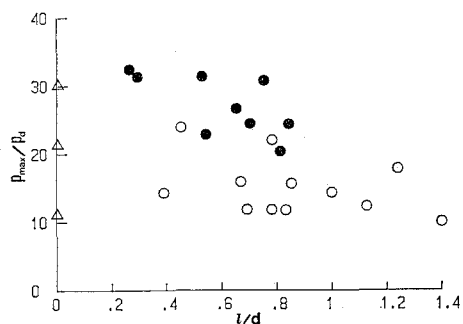


図-9 p_{max}/p_d と l/d の関係

(△: 単発型, ●: 減衰振動 A 型, ○: 減衰振動 B 型)

衝撃波圧の算定には、作用流体塊の有効質量を知る必要がある。そこで、 p_{max} , l , d , u_b の測定値を使用して、式(3)により仮想水塊長 K を算定し、 K/H_b と l/d との関係を図-10に示す。なお、封入空気厚が極めて薄い単発型衝撃圧の K は、衝撃圧の力積を使用して式(5)によって算定した。

$$K = (p_{max} \cdot \tau_s) / (2\rho_w u_b) \quad (5)$$

ここで、 τ_s : p_{max} 発生までの波圧作用時間。単発型の K/H_b 値としては 0.3~0.45, 減衰振動 A 型は l/d と共に若干増大する傾向、また B 型は 0.2~0.4 となっている。写真-1 と 2 に見られるように、単発型と減衰 A 型の場合の H_b の判定に困難があったが、衝撃砕波算定モデルでの K の評価法を考慮して、本研究では K/H_b を採用した。これまで、Bagnold(1939) は $K/H_b = 0.2$, 林ら(1958) は $K/H_b = 0.33$ を提案しているが、本実験結果より林らの K/H_b 値がほぼ妥当と思われる。

6. 結 論

直立堤体と砕波波面間に封入される空気塊の断熱圧縮と離脱過程に着目して、衝撃性砕波圧の発生機構を現象論的に検討し、単純化したモデルでその機構の解明を試みた。その結果、衝撃性砕波圧波形は単発型、減衰振動

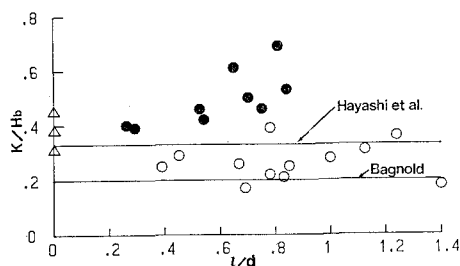


図-10 K/H_b と l/d との関係(記号: 図-9 参照)

型、およびふた山型の三種類に分類(合田, 1967)され、そのいずれの発生にも封入空気塊の存在とその断熱圧縮・離脱過程が、大きく関係することが認められた。

特に、減衰振動型衝撃砕波圧は比較的大きな空気塊が巻き込まれる場合に発生し、封入空気塊の圧縮離脱状況により波圧波形変動に加えて、振動周波数が変化することが、波圧測定出力と高速撮影ビデオ画像の同期解析から明らかにされた。ふた山型衝撃砕波圧は砕波波頂が直接圧力センサーに衝突する場合に発生することが判明した。したがって、減衰振動型衝撃波圧の場合にも波頂衝突ヶ所では、ふた山型波圧が発生していると言える。

波圧算定モデルを開発するに当り必要となる、衝撃波圧の発生に寄与する衝突砕波水塊の有効質量を、仮想水塊長 K で評価した。

謝 辞

本研究に当たり、東京大学磯部雅彦助教授には貴重なご意見を頂き、また当時中央大学学部学生であった西川公次・吉原伸二の両君には実験・データ解析に協力頂いた。ここに記して謝意を表する。なお本研究の一部は、文部省科研費一般研究 C で行ったことを記す。

参 考 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎 (1988): 土木学会第43回年講概要集Ⅱ, pp. 628~629.
- 合田良実 (1967): 土木学会, 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 10~1~34.
- 合田良実・原中祐人 (1967): 港湾技研資料, No. 32, 18 p.
- 永井莊七郎 (1958): 第 5 回海岸工学講演集, pp. 29~39.
- 林 泰造・服部昌太郎 (1957): 第 4 回海岸工学講演集, pp. 15~24.
- 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉 (1958): 第 5 回海岸工学講演集, pp. 21~27.
- 堀川清司・野口雄二 (1970): 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 177~184.
- Bagnold, R. A. (1939): Jour. of the Institution of Civil Engineering, Vol. 12, N1. 7, pp. 202~226.
- Kamel, A. M. (1970): Proc. ASCE, Vol. 96, No. WW 3, pp. 689~699.
- Mitsuyasu, H. (1966): Proc. 10 th ICCE, pp. 268~283.
- Ross, C. W. (1955): B. E. B. Tech. Memo. No. 59.