

各種消波護岸の越波流量特性

高山知司*・永井紀彦**・菊地 治***
西田一彦****・関口忠志*****

1. まえがき

海岸護岸の天端高の設定にあたっては、越波流量を許容値以下におさえることが重要である。しかし、環境や景観面および海浜利用上の配慮から、天端高をなるべく低くおさえる要請が近年強まっている。このため、異形ブロックを護岸前面に設置するブロック積み消波護岸、縦スリット状の直立消波護岸、斜・階段状の護岸、あるいは、護岸前面に異形ブロック積みの透過式離岸堤を設置する工法などが行なわれている。しかし、このような消波構造護岸を有効に用いるためには、これらの護岸の越波流量特性を把握しておくことが必要になる。本研究は、不規則波を用いた越波流量模型実験を実施し、各種消波護岸の越波流量特性を検討したものである。

2. 実験

実験は、長さ 30 m、幅 5 m、深さ 1 m の不規則波造波水槽の一部を仕切った幅 60 cm の水路で行なった。海底勾配 i は 1/10 と 1/30 の 2 種類とし、水路内に木製の斜面模型を設置した。実験波としては、ブレットシュナイダー・光易型のスペクトルを持つ不規則波を用い、沖波波形勾配 H_0/L_0 は 0.012 および 0.03 とした。透過式離岸堤は、1/33 縮尺として現地換算 17.8 t となるテトラポッド模型を用いて製作し、ブロック 3 段積み(下層 4 列)で、天端部はブロック 2 列並びとした。

越波実験は、図-1 に示すフローに従って実施した。波形データはデータレコーダに一度記録し、A/D 変換を行なった後に大型計算機を用いて統計処理した。水路内では造波板と護岸の間で多重反射が生じるため、2 台の波高計による同時記録から、入・反射波を分離することによって入射波高を求めた。こうして求めた入射波高

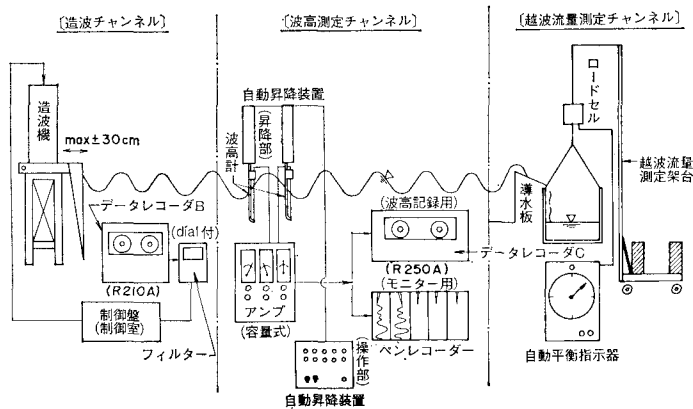


図-1 越波実験のフロー

を波高計設置水深における浅水係数で除した値が、換算沖波波高 H_0 である。また、越波流量は護岸を越波した水の重量をロードセルを用いて測定して求めた。

実験結果はすべて H_0 で無次元化して考察した。越波流量の無次元量としては、せきの越流式で求まる無次元量である $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を用いた²⁾。ここに、 q は単位幅単位時間当りの越波流量であり、 g は重力加速度である。また、越波量の考察に当っては、ここで得られた実験結果に加えて、すでに発表されている同種の実験結果も用いた^{3), 4), 5)}。

3. 直立護岸の越波流量算定式

直立護岸の越波流量に関しては、合田⁶⁾ が海底勾配と波形勾配別に越波流量算定式をすでに提示している。しかし、任意の海底勾配および波形勾配の場合、越波量の算定のためには内挿や外挿を行なわなければならない。また、越波流量から所要天端高を直接算定することができない。そこで、波の浅水変形特性を考慮して合田の算定図を近似する式を作成し、これらの問題を取り除くことを考えた。

図-2 は、算定式の作成にあたって考慮した、波の浅水変形における領域区分を示したものである。砕波点を境界として、それより沖側を Shoaling 領域、それより岸側を Breaking 領域とここでは定義する。この 2 つの領域に関しては、合田⁶⁾ が不規則波の波高変化と平均水

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

*** 運輸省第二港湾建設局官古港工事事務所

**** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

***** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

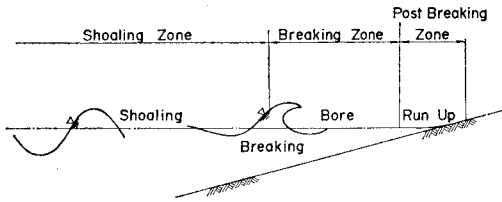


図-2 波の変形における3領域

位上昇量を算定する手法を提示している。しかし、汀線付近では波というよりは流れに近い状態となり、有義波高などの波に関する諸元を求めることが困難になる。このような領域をここでは Post Breaking 領域と呼ぶ。Breaking 領域と Post Breaking 領域の境界に関しては明確な基準はまだ与えられていないため、ここではこの境界となる水深は、Hunt⁷⁾による波のはいり高さに等しい水深と仮定すると、その水深 h は $h/H_0 = i/\sqrt{H_0/L_0}$ で与えられる。ここに、 i は海底勾配、 H_0/L_0 は沖波波形勾配を示している。

図-3 は合田による算定図を近似して求めた直立護岸の越波流量算定フローを示したものである⁸⁾。護岸設置水深 h が $h \geq 0$ となる Post Breaking 領域に護岸が位置するとき、および Shoaling 領域に護岸が位置するときは、算定図をそのまま近似する式を求めた。護岸が

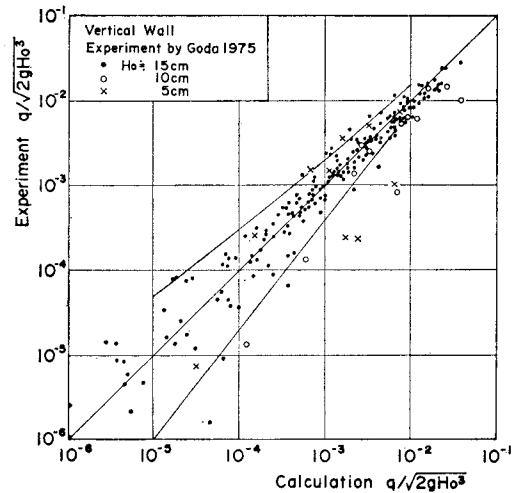


図-4 直立護岸越波流量の実験値と算定値の比較

Breaking 領域に位置するときは、護岸の天端高 h_c から平均水位上昇量 η を減じた実質天端高 ($h_c - \eta$) と、来襲波の有義波高 H_s から、越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を求める関係式を導いた。Post Breaking 領域にある $0 < h/H_0 < i/\sqrt{H_0/L_0}$ では、 $h/H_0 = 0$ における $q/\sqrt{2gH_0^3}$ と $h/H_0 = i/\sqrt{H_0/L_0}$ における $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を対数補間して、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を求めた。また、Breaking 領域と Shoaling 領域の境界は、 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ が連続になるように逆に定義した。図-3 によって天端高と越波流量の関係が一意的に定まるので、消波構造による越波流量減少効果を、天端高低減係数 β に換算することができるようになった。ここに、 β は同一越波流量となる消波護岸と直立護岸の天端高の比として定義される量である。 β の値が小さいほど天端高低減効果が大きいことを示し、逆に $\beta > 1$ となると直立護岸より高い天端高を要することを意味する。

図-4 は算定式によって求められた越波流量と実験値を比較したものである。横軸には実験条件から図-3 を用いて算定される $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を示し、縦軸には実験から得られた $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を示している、合田による越波流量算定図の精度は表-

表-1 合田による越波流量算定精度

$q/\sqrt{2gH_0^3}$	Type of Seawall	
	Vertical	Block Mounted
10^{-2}	$\times 0.7 \sim 1.5$	$\times 0.5 \sim 2$
10^{-3}	$0.4 \sim 2$	$0.2 \sim 3$
10^{-4}	$0.2 \sim 3$	$0.1 \sim 5$
10^{-5}	$0.1 \sim 5$	$0.05 \sim 10$

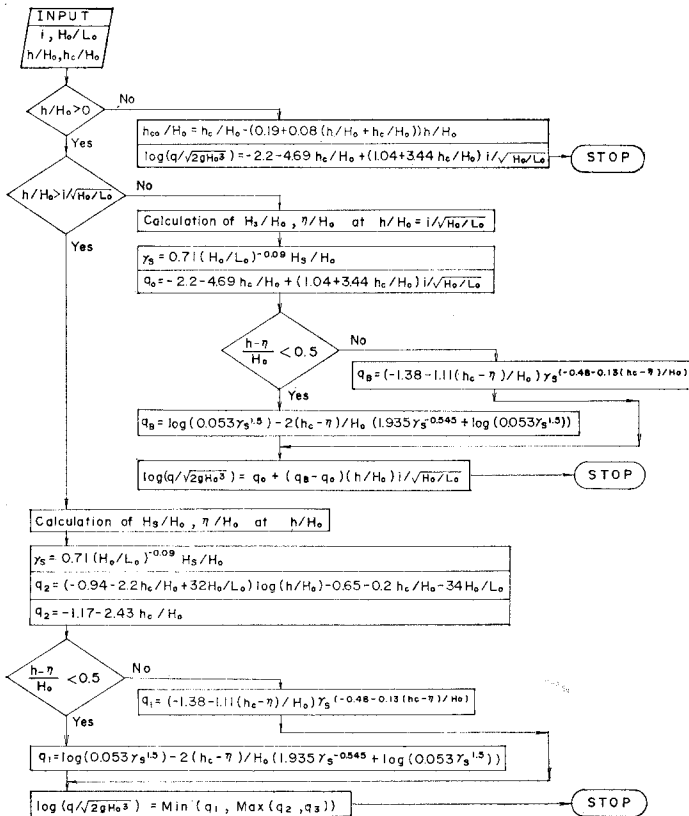


図-3 直立護岸の越波流量算定フロー

1のように求められているが、図中に示される中央の直線の両側の直線は、表-1による算定精度の範囲を示したものである。

図-4から、実験値と算定値は表-1に示す算定精度の範囲内でよく一致していることがわかる。換算沖波高 H_0 が小さくなると若干ばらつきが大きくなっているが、これは採水される水量が少なくなるため実験精度が低下することにもよると考えられる。なお、表-1に示される越波流量の算定精度は、護岸天端高に換算すると $\pm 20\%$ 程度である。

4. 消波護岸の天端高低減係数

4.1 ブロック積み消波護岸

護岸の前面に異型ブロックを設置した護岸をブロック積み消波護岸と呼ぶことにする。ブロック積み消波護岸の越波流量は、直立護岸と同様に合田によって算定図が求められている。ここでは、両算定図を比較することによってブロック積み消波護岸の天端高低減係数 β_B を図-5に示すように求めた。

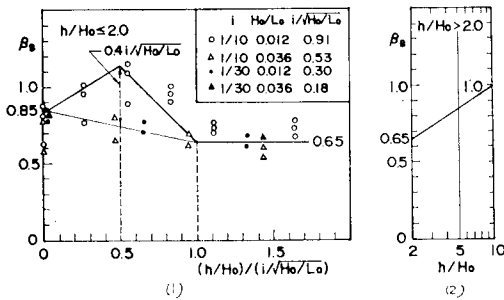


図-5 ブロック積み護岸の天端高低減係数 β_B

図-5(1)は、 $h/H_0 \leq 2.0$ となる場合の β_B 算定図であり、横軸には h/H_0 を $i/\sqrt{H_0/L_0}$ で除した値を示している。横軸が0となる汀線上では $\beta_B = 0.85$ となり、横軸が1.0より大きいBreaking領域では $\beta_B = 0.65$ となる。その間の横軸が0.5となるときの β_B は、 $i/\sqrt{H_0/L_0}$ が0.91と比較的大きい場合には、0.85と0.65の間を補間した0.75より0.35程度大きく $\beta_B \approx 1.1$ となり、それより $i/\sqrt{H_0/L_0}$ が小さい場合には β_B は0.75に近い値となっている。 $i/\sqrt{H_0/L_0}$ が大きいことは波のはいり高が高く、波による斜面上の遡上流量が大きいことを意味する。そのため、 $i/\sqrt{H_0/L_0}$ が大きい波では、消波ブロック上を大流量の波が遡上することによって越波流量が増大すると考えられる。そこで、横軸が0.5となる β_B は0.75より $i/\sqrt{H_0/L_0}$ に比例した値だけ大きくなると仮定し、その比例定数を $i/\sqrt{H_0/L_0} = 0.91$ の場合から $(1.1 - 0.75)/0.91 \approx 0.4$ と定めた。横軸が0と0.5の間は $0.75 + 0.4i/\sqrt{H_0/L_0}$ と0.65を直線で結んだ。

図-5(2)は、Shoaling領域の β_B を示す。 h/H_0 が大きくなり10程度になると、 β_B はほぼ1.0になることが合田の算定図から求まるので、ここでは合田の算定図に従い $h/H_0 = 2.0$ では $\beta_B = 0.65$ 、 $h/H_0 = 10$ では $\beta_B = 1.0$ としてその間の h/H_0 の対数を直線で結んだ。

図-5から求める β_B を、護岸天端高 hc/H_0 に乗じて図-3によって算定される $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を実験値と比較すると、ブロック積み消波護岸の越波流量算定値は、ほぼ表-1の右側に示した算定精度内に納まることが確認された⁹⁾。

4.2 直立消波護岸

護岸の設置水深がある程度以上深くなると、ブロック積み消波護岸より、縦スリット型の直立消波護岸の方が建設費が安くなる場合がある。ここでは、 $h = 15 \sim 22.5$ cmのBreaking領域に設置された奥行き30cmの直立消波護岸の天端高低減係数 β_V を求めた。

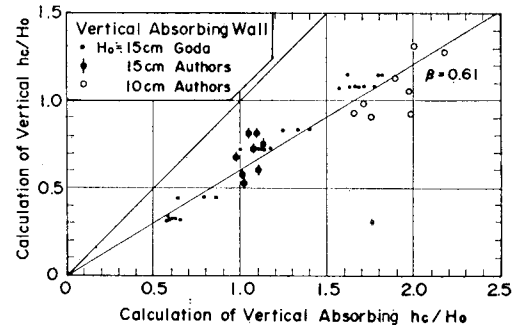


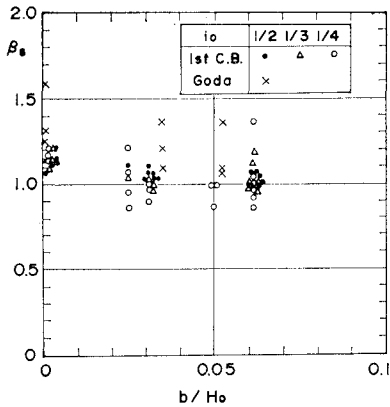
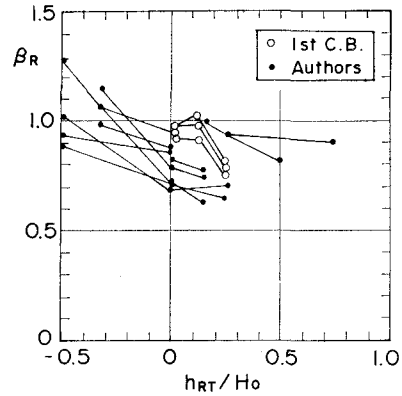
図-6 直立消波による所要天端高の減少

図-6は直立消波による越波流量の減少効果を所要天端高に換算したものである。横軸には直立消波護岸に関して、実験で得られた $q/\sqrt{2gH_0^3}$ から図-3を収束計算して得られた hc/H_0 を示し、縦軸には直立護岸に関して、実験で得られた $q/\sqrt{2gH_0^3}$ から同様に求めた hc/H_0 を示している。この図から、 β_V はほぼ一定の値を持っていることがわかる。なお、各点の β_V の値を平均すると $\beta_V = 0.61$ となった。

4.3 斜・階段護岸

汀線付近に設置される護岸形状の一つとして階段護岸がある。護岸に傾斜がある場合は、同一天端高の直立護岸より越波流量が増加し、斜・階段護岸の天端高低減係数 β_S が1.0より大きくなることが知られている^{4),9)}。

図-7は、汀線上に設置された階段護岸の形状と β_S との関係を示したものである。横軸には階段1段のステップ高さ b を H_0 で除した値をとり、パラメータとして階段護岸の傾斜角 i_0 をとった。 $b/H_0 = 0$ となる場合を、ここでは斜護岸と呼ぶ。図-7から、斜護岸の方が、 $b/H_0 > 0$ である階段護岸より β_S が大きくなっていること、および階段護岸においては、 b/H_0 や i_0 は β_S にあ

図-7 階段護岸の形状と β_s 図-9 離岸堤天端高と β_R

まり影響を与えていないことがわかる。汀線上の斜・階段護岸の β_s は 1.1~1.2 程度となり、直立護岸より天端高を高くする必要がある。

5. 離岸堤設置による護岸の天端高低減特性

5.1 離岸堤背後の直立護岸

図-8 は、横軸に離岸堤設置水深 h_R を H_0 で除し無

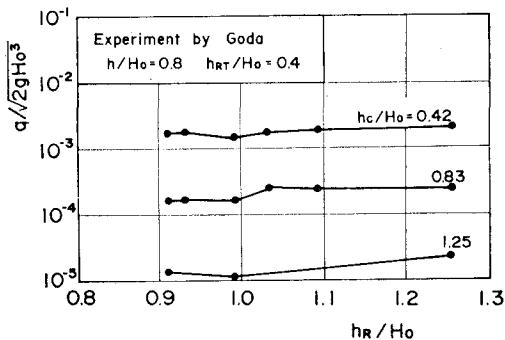
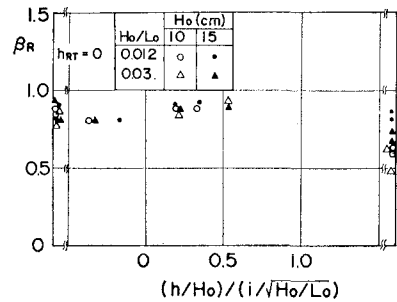


図-8 離岸堤設置水深と越波流量

次元化した値を示し、縦軸に $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を示し、離岸堤の設置水深による背後の直立護岸の越波流量の変化を調べたものである。離岸堤の水面からの天端高 h_{RT} は、ここでは、離岸堤下部の砕石マウンドの高さを調整することによって H_0 との比において 0.4 の一定となっている。図-8 から、離岸堤の設置水深によっては、背後の直立護岸の越波流量はあまり変化しないことがわかる。

図-9 は、離岸堤の天端高 h_{RT}/H_0 と、離岸堤による天端高低減係数 β_R の関係を示したものである。ここで β_R は、離岸堤を前面に設置した場合の $q/\sqrt{2gH_0^3}$ と、直立護岸だけの場合の $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を図-3 から h_0/H_0 に換算し、その比として計算された値である。図-9 から、全体的に右下りとなる傾向を読み取ることができ、離岸堤の天端高を高くすれば、護岸の天端高を下げることを示している。

図-10 は、護岸の設置水深 h/H_0 と β_R の関係を示

図-10 護岸設置水深と β_R

したものである。横軸には、図-5 (1) と同様に $(h/H_0)/(i/\sqrt{H_0/L_0})$ をとり、護岸設置水深における波の領域区分を示した。図-9 で明らかになったように、離岸堤の天端高 h_{RT}/H_0 は β_R に大きな影響を与えるため、ここでは $h_{RT}=0$ となる実験値だけをプロットした。図-10 の左右両端の点は、横軸が -1.5 より小さい点または 1.5 より大きい点を意味している。横軸が 1.0 より大きい Breaking 領域では $\beta_R=0.5\sim0.9$ 、横軸が 0 と 1.0 の間では $\beta_R\approx0.9$ 、横軸が負となるときは $\beta_R=0.8\sim0.9$ となっており、横軸が 0 と 1.0 の間で β_R はもっとも大きくなる傾向を示す。この傾向は、図-5 (1) のブロック積み消波護岸の β_B の特性とよく似ている。

5.2 離岸堤背後の消波護岸の越波流量

図-11 は、天端高 $h_{RT}=0$ となる離岸堤を前面に設

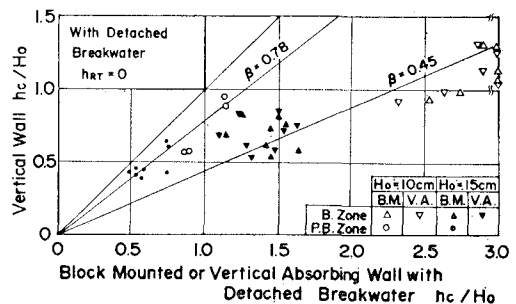


図-11 離岸堤・消波工併設による所要天端高の減少

置したブロック積み消波護岸あるいは直立消波護岸の越波流量と、離岸堤を設置しない同じ天端高の直立護岸の越波流量とを、それぞれ 図-3 から h_0/H_0 に換算し横軸と縦軸にプロットしたものである。図中の B.M. はブロック積み消波護岸、V.A. は直立消波護岸を意味し、護岸が Breaking 領域と Post Breaking 領域にある場合の記号を区別している。

護岸が Breaking 領域にあるときの β は、B.M. および V.A. と同様な値を示しており、 $\beta=0.3\sim0.7$ の間を平均値 0.45 で分布している。この場合、離岸堤を設置しない場合の天端高低減係数は、図-5 および 図-6 からそれぞれ $\beta_B=0.65$, $\beta_V=0.61$ と求められている。また前面に離岸堤を設置した直立護岸の β_R は、図-10 から $\beta_R=0.5\sim0.9$ となっている。 β_B と β_R , β_V と β_R のそれぞれの積はどちらも $0.3\sim0.6$ となり、図-11 の $\beta=0.3\sim0.7$ とほぼ一致している。

同様に、護岸が Post Breaking 領域にあるときは、図-5 から $\beta_B=0.65\sim1.1$, 図-10 から $\beta_R=0.8\sim0.9$ となっており、その積は $0.52\sim1.0$ となるがこれは図-11 で、 β が $0.6\sim1.0$ の間を平均値 0.78 で分布しているのとほぼ一致している。

すなわち、離岸堤と消波工を併設した場合の天端高低減係数は、離岸堤による天端高低減係数と各種消波護岸による天端高低減係数の積にほぼ一致することが、本実験の範囲内で明らかになった。しかし、これらのことが全ての条件についても成立するかどうかは、今後理論的検討および条件の異なる数多くの実験を行なう必要がある。

6. ま と め

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 直立護岸の越波流量算定式を提案した。これは、波の斜面上の Shoaling, Breaking, Post Breaking といった変形領域別に、合田による越波流量算定図を近似したものである。この算定式によって消波護岸による越波流量減少効果を天端高低減係数 β に換算することができるようになった。
- (2) ブロック積み消波護岸の天端高低減係数 β_B を、図-5 に示すように提案した。
- (3) 直立消波護岸の天端高低減係数 β_V は、本実験の範

囲ではほぼ一定値を示し、 $\beta_V=0.61$ となった。

- (4) 汀線上に設置された斜・階段護岸は、天端高低減係数 β_S が $1.1\sim1.2$ 程度となり、直立護岸より天端高を高くする必要がある。
- (5) 離岸堤設置による天端高低減係数 β_R は、本実験の範囲では離岸堤設置水深によってあまり変化せず、離岸堤の天端高と護岸の設置水深によって大きく変化する。
- (6) 離岸堤と消波工を併設した場合の天端高低減係数は、離岸堤による天端高低減係数と各種消波護岸による天端高低減係数の積にほぼ一致することが、本実験の範囲内で明らかになった。しかし、このことが全ての条件についても成立するかどうかは、今後、理論的検討および条件の異なる数多くの実験を行なっていく必要がある。

本研究の実施にあたって、運輸省港湾局防災課に御協力いただき、第一港湾建設局から越波実験に関するデータをいただいた。また、港湾技術研究所の合田良実水工部長からは終始有益な御教示をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料 No. 248, 24 p., 1976.
- 2) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 9 巻 4 号, pp. 1~41, 1970.
- 3) 合田良実・岸良安治・神山 豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻 4 号, pp. 3~44, 1975.
- 4) 合田良実・岸良安治: 不規則波による低天端護岸の越波特性実験, 港湾技研資料 No. 242, 28 p., 1976.
- 5) 運輸省第一港湾建設局: 越波量模型実験報告書 (部内資料), 昭和 54 年度, 55 年度および 56 年度.
- 6) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻 3 号, pp. 59~106, 1975.
- 7) Hunt, I. A.: Design of Seawalls and Breakwaters, Proceedings, ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123~152, 1959.
- 8) 高山知司・永井紀彦・西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻 2 号, 1982.
- 9) 高田 彰・吉田吉治・藤川治生: 海岸堤防・護岸の断面形状と越波量との関係, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1979.