

越波のある場合の重複波の波頂高について

遠藤 茂勝*・落合 実**・三浦 晃***

1. 緒 言

海岸構造物設置水域の拡大にともなって、防波構造物の設置水深が必然的に増大し、いわゆる重複波の発生領域にまで構造物が計画されるようになってきた。その結果、防波構造物は大規模化し、構造物の安定性の面から考えても不利な条件が増し、従来のような非越波型の構造物を作ることとは得策ではなく、またあらゆる波の場合について非越波であるような防波構造物は、現実にはありえないわけで、むしろ逆に波が防波構造物を越える時の波の挙動特性を知った上で、構造物を設計する方がより効果的であることは言うまでもない。

これまで壁面における波頂高に関する研究あるいは、重複波の波峰水位に関する研究は^{1)~13)}、かなり多く行なわれているが、いずれの研究も無越波時の場合を扱ったもので、越波する場合の壁面での波頂高については、これまであまり研究がなされていないようである。そして壁面での波頂高は、越波することによって減少するので、本文では、鉛直壁の天端が波頂高より低く、常に越波が生ずるような低い堤体の堤高と重複波の波頂高との関係について検討したものである。

2. 実験施設および実験方法

(1) 実験装置

実験は、長さ 27.6 m、幅 0.7 m、高さ 1.0 m の両面ガラス張りの二次元水路を用いた。この水路には、ピストン式造波装置が一端にあり、また他端と造波板背後には、反射波を減少させるための横スリット型の消波構造が約 1.0 m の区間に 5 層設けられている。造波機は、5.5 kW の動力によって駆動されるが、造波される波の周期を確実に調整できるように造波機コントロール回路に多回転ポテンシャルメーターを採用するとともに、造波周期は、光電式検出器を用いたデジタルカウンターによって 1/1 000 sec まで検出され、所定の周期の造波

が容易に確認できるようになっていて、装置全体の再現性が計られている。

(2) 計測装置

波高の測定には、容量式波高検出器を用い、水位計増幅器に接続し、デジタル波高記録装置に記録した。ここに用いた波高記録装置は、波高および周期を同時に計測できるもので、特に水位レベルについては、静水時の水面を基準として、波の峯あるいは谷までの水位をそれぞれ検出し、メモリー回路にホールドされているので、キーファンクションの選択によって、静水面上の峯高あるいは波高値 (Peak to Peak) などをデジタル量で記録することができる。そして波高および周期の測定結果は、それぞれ 1/100 cm、1/100 sec まで示され、計測装置の精度が得られるよう水位計増幅器のポテンシャルメーターなどは、デジタル記録装置に対応できるような精度のものに替え一部を改造したものである。

(3) 実験方法

実験は、水路のほぼ中央で、造波板からの距離が 13.00 m の地点に厚さ 0.6 cm の鋼製板を用いた鉛直防波堤模型を設置した。この模型は、2 枚からなる一組の板で作られ沖側の板を 1.0 cm ずつの間隔で高さを変えられるようになっている。

実験は、波が堤体を越えて越波する場合と無越波状態に分けて行ない、越波状態の実験では、堤体高を静水面より越波が見られなくなるまでの堤高とし、堤脚水深を 40.0 cm とした。また無越波状態の実験では、全ての波が越波しない高さとして堤高を 58.0 cm とした。堤脚水深は 20.0 cm から 40.0 cm まで 5.0 cm ごとに変え、相対水深が $h/L=0.107, 0.135, 0.170$ の 3 種類で一定とし入射波波形勾配を変えた。海底勾配は、いずれの実験も $\tan \alpha=0$ である。そして、鉛直壁前面の重複波の波頂高、波底高および重複波高などの測定は、壁面で著しい跳波が認められなかったので壁面から約 0.5 cm 離れた地点で測定した。これらの測定波のデータ処理については、無堤時の堤体設置地点で測定した入射波高のデータ処理法¹⁴⁾に準じた。そして本実験条件は、表-1 に示したとおりである。

* 正会員 工修 日本大学講師 生産工学部 土木工学科

** 正会員 工修 日本大学副手 生産工学部 土木工学科

*** 正会員 理博 日本大学教授 生産工学部 土木工学科

表-1 (1) 実験条件 (越波時)

海底勾配 $\tan \alpha$	堤脚水深 h (cm)	周期 T (sec)	入射波高 H_i (cm)	入射波長 L (cm)	H_i/L	h/L	h/H_i
0	40.0	1.2	12.78	193.48	0.066	0.207	3.13
			14.69		0.076		2.72
			16.47		0.085		2.43
0	40.0	1.4	10.68	239.12	0.047	0.167	3.75
			12.16		0.051		3.29
			13.98		0.059		2.86
0	40.0	1.6	9.18	283.42	0.032	0.141	4.36
			10.26		0.036		3.90
			11.89		0.043		3.36
0	40.0	1.8	7.32	326.71	0.022	0.122	5.46
			8.53		0.026		4.52
			9.64		0.030		4.15
0	40.0	2.0	5.96	369.28	0.016	0.108	6.71
			7.21		0.020		5.55
			8.27		0.022		4.84
0	40.0	2.2	5.42	411.31	0.013	0.097	7.38
			6.48		0.016		6.17
			7.35		0.018		5.44

(2) (無越波時)

海底勾配 $\tan \alpha$	堤脚水深 h (cm)	周期 T (sec)	入射波長 L (cm)	周期 T (sec)	入射波長 L (cm)	周期 T (sec)	入射波長 L (cm)
0	40.0	2.02	373.50	1.66	296.49	1.39	236.88
0	35.0	1.89	326.91	1.55	258.87	1.30	207.22
0	30.0	1.75	280.24	1.44	222.82	1.20	176.92
0	25.0	1.60	233.95	1.31	184.91	1.10	148.25
0	20.0	1.43	187.00	1.17	147.66	0.97	116.39
h/L		0.107		0.135		0.170	

3. 実験結果

(1) 無越波である場合の波頂高

無越波時の重複波の波頂高の特性を調べる。相対水深 $h/L=0.107, 0.135, 0.170$ の3条件について入射波波形勾配 H_i/L に対する傾向を示したものが、図-1 (a) である。縦軸には、静水面から測定した波頂高 $\eta_{\max}$ および波底高 $\eta_{\min}$ を入射波の波高 H_i で無次元化したものを、また横軸には、入射波波形勾配 H_i/L をとってまとめた。

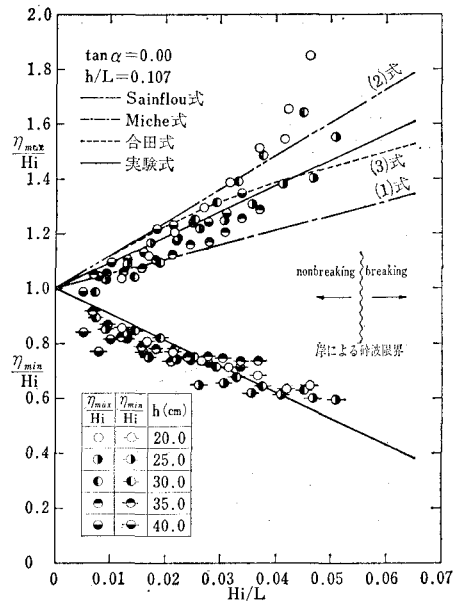
図の波頂高の結果に示される曲線は、有限振幅重複波理論による近似理論式の結果で、それぞれ次式によって計算される。

一点鎖線で示したものは、次の (1) 式の Sainflou 式によるものである。

$$\frac{\eta_{\max}}{H_i} = 1 + \frac{\pi H_i}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また2点鎖線は、(2) 式の Miche の第2次近似式である。

$$\frac{\eta_{\max}}{H_i} = 1 + \frac{\pi H_i}{4L} \left(3 \coth^3 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-1 (a) 波頂高の理論値と実験値 ($h/L=0.107$)

また同様に点線で示したものは、(3) 式の合田の第4次近似式の計算結果である。

$$\frac{\eta_{\max}}{H_i} = 1 + \delta_{IV} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_{IV} = \delta_{III} + \frac{1}{6} \left(\frac{2\pi H_i}{L} \right)^3 \left\{ \epsilon_A^4 (b_{02} + b_{22} + b_{42} + b_{04} + b_{24} + b_{44}) \right.$$

$$\left. \delta_{III} = \epsilon_A^2 \times \delta_{II} \right.$$

$$\delta_{II} = \frac{\pi H_i}{4L} \left(3 \coth^3 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right)$$

$$\epsilon_A = S^{1/3} \left\{ \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{S}{27}} \right)^{1/3} + \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{S}{27}} \right)^{1/3} \right\}$$

$$S = 2 \left/ \left(\frac{2\pi H_i}{L} \right)^2 \cdot (b_{11} + b_{13} + b_{31} + b_{33}) \right.$$

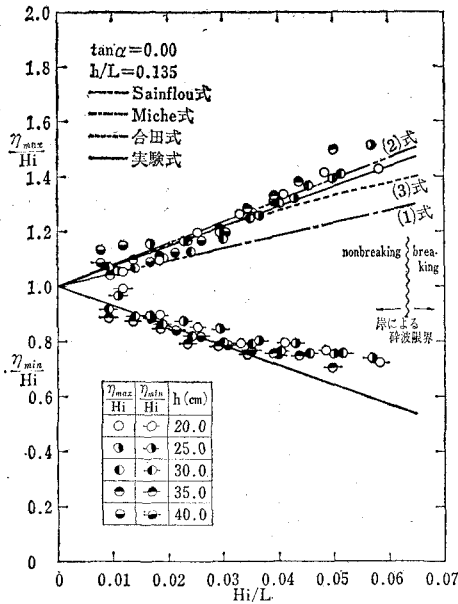
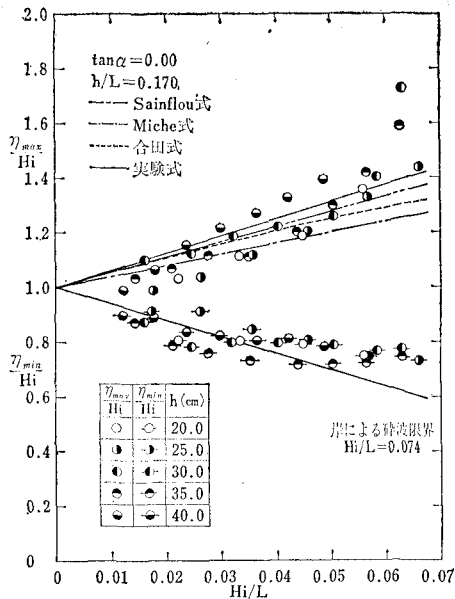
ここに $b_{11}, b_{13}, b_{31}, b_{33}$ および $b_{02}, b_{22}, b_{42}, b_{04}, b_{24}, b_{44}$ は、それぞれ $\tanh 2\pi h/L$ の関数で表わされる第3次近似解および第4次近似解の定数である。

また重複波の碎波限界については、岸による次式がある。

$$\left(\frac{H_i}{L} \right)_c = \frac{0.592}{2\pi} \cdot \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4) 式による碎波限界波形勾配は、 $h/L=0.107$ のとき $(H_i/L)_c=0.055$ となるが、実験結果は、これよりやや小さい波で碎波に移行する。この碎波への移行の限界は、相対水深が 0.135 および 0.170 の場合についても図-1 (b), (c) に示されるように同様な傾向となることが認められる。

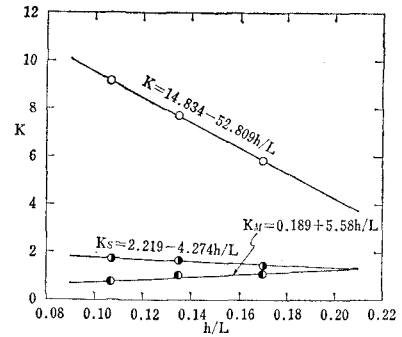
そして碎波状態に移行している2, 3の結果を除けば、図-1 (a), (b), (c) にみられるように波頂高 $\eta_{\max}/H_i$ と

図-1 (b) 波頂高の理論値と実験値 ($h/L=0.135$)図-1 (c) 波頂高の理論値と実験値 ($h/L=0.170$)

入射波波形勾配 H_i/L の関係は、ほぼ直線関係となることがわかる。そこで、(1) 式、(2) 式、(3) 式で計算される近似解は、実験結果を十分満足しないので、実験値の平均曲線から推定式を求めると次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{max}/H_i &= 1.0 + 9.167 H_i/L \\ (h/L &= 0.107 \text{ のとき}) \\ \eta_{max}/H_i &= 1.0 + 7.733 H_i/L \\ (h/L &= 0.135 \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

$$\eta_{max}/H_i = 1.0 + 5.833 H_i/L \quad (h/L = 0.170 \text{ のとき})$$

図-2 h/L に対する波頂高係数の関係

従って、(5) 式から 図-2 を用いて次のように導ける。

$$\eta_{max}/H_i = 1.0 + K \cdot H_i/L \quad \dots\dots (6)$$

ここで $K = 14.834 - 52.509 h/L$

また、図-1 (a), (b), (c) からわかるように (1) 式、(2) 式は、直線式となるので、(6) 式を、(1) 式又は (2) 式で表わすと次のようになる。

$$\eta_{max}/H_i = 1.0 + K_s (\pi \coth 2\pi h/L) \cdot H_i/L \quad \dots (7)$$

ここで $K_s = 2.219 - 4.274 \cdot h/L$

又は、

$$\eta_{max}/H_i = 1.0 + K_M \frac{\pi}{4} \cdot \left(3 \coth^3 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \cdot H_i/L \quad \dots\dots (8)$$

ここで $K_M = 0.189 + 5.556 h/L$

(6) 式、(7) 式、(8) 式は、本実験結果を満足する実験式であるが、幅広い適用範囲を満足する実験式としては、合田による第4近似解や実験結果等を考慮して、(8) 式が適当であると考えられる。

これらの式中では、波高を入射波高として用いているが重複波の壁前面波高の $1/2$ の値を波高 H とすると、有限振幅重複波理論の第3次近似解で明らかにされているように、入射波高 H_i との関係は、次のようになる。

$$\frac{H}{H_i} = 1 + \frac{(1/4)(k \cdot \epsilon_A \cdot H)^2 \{w - w^{-1} + 2 + 4(b_{31} + b_{13})\}}{2 + (k \cdot \epsilon_A \cdot H)^2 \cdot (b_{11} + b_{33})} \quad \dots\dots (9)$$

ここに $k = 2\pi/L$, $w = \tanh^2 kh$

すなわち $H > H_i$ となる。そこで本実験における計算は、全て堤体設置地点での無堤時の波高を入射波高 H_i として計算した。

ここで、本実験における無越波時の波頂高の推定式として (8) 式がえられたのでこの (8) 式の適合性を評価するために、合田の第4次近似解の計算結果とを同時に表わした図が 図-3 である。縦軸に波頂高の無次元量 η_{max}/H_i をとり、横軸には、入射波波形勾配 H_i/L を

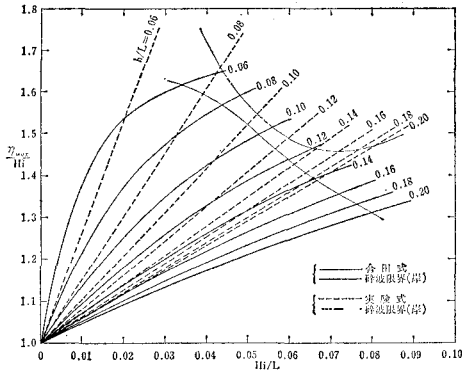


図-3 波頂高の理論式と実験式の比較

として、相対水深 h/L をパラメータとして示した図である。また重複波の碎波限界は、岸による理論式 (4) 式によって計算されるので、その結果を同時に示した。

この曲線の下側が重複波領域となるので、その範囲内で第4次式と実験式を比較する。相対水深がきわめて小さいときは計算値相互の間に約 10% 程度の差が認められるが、また相対水深が 0.1 程度になるとその差はほとんどなく、いずれの場合にも碎波点附近は、実験式による方が多少大きな値となっている。しかし全体的にほぼ一致しているものと考えられ、第4次近似式は、計算が容易でないことから、重複波の波頂高を推定する実験式として (8) 式が有効であるといえる。

次に波底高については、重複波の波の峯から谷までの高さが、入射波高の 2 倍となると仮定すると

$$\frac{\eta_{max}}{H_i} + \frac{\eta_{min}}{H_i} = 2.0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

となるから、(8) 式から鉛直壁の前面水位の波底高 η_{min}/H_i は次のようになる。

$$\frac{\eta_{min}}{H_i} = 1 - \left(0.189 + 5.556 \frac{h}{L} \right) \frac{\pi H_i}{4L} \times \left(3 \coth^3 \frac{2\pi h}{L} + \tanh \frac{2\pi h}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

この結果は、図-1 (a), (b), (c) の図中の下側の直線で示される実験結果とおおむね一致しているが、 H_i/L が大きいところで (11) 式の結果より実験値が大きくなっている。これは、(9) 式に示すように重複波高が入射波の 2 倍以上になることを示すものである。すなわち、入射波の波形勾配の増大とともに波頂高は、ほぼ直線的に増大するのに対して波底高は、入射波波形勾配の増大とともに減少するが、 $H_i/L \approx 0.05$ になると波底高は増加の傾向を示すことから、重複波高が入射波高の 2 倍以上になるのは、波頂高より、むしろ波底高が変動することによるものと考えられる。

(2) 越波のある場合の波頂高

無越波時の波頂高は、(8) 式により求められたので、

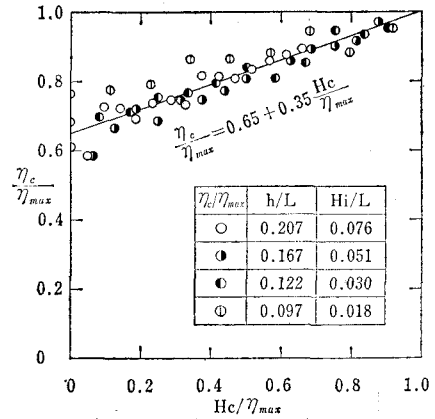


図-4 越波時の堤高と波頂高の関係

ここで越波のある時の波頂高との関連について検討する。

越波のある時の波頂高の実験結果の一例をまとめたものが次の図-4である。

図は、縦軸に越波時の波頂高 η_c と無越波時の波頂高 η_{max} の比をとり横軸に静水面上の天端高 H_c と η_{max} の比をとって示したものである。

横軸の値が 1.0 すなわち $H_c/\eta_{max} = 1.0$ の場合が、無越波となる限界の堤高で、その時の $\eta_c/\eta_{max} = 1.0$ となり、越波時の極値として $\eta_c = \eta_{max}$ となる。また図から $H_c/\eta_{max} = 0$ のとき η_c/η_{max} は、0.65 でほぼ一定となっている。

従って越波のある時の堤高の変化に対する波頂高は、次式で示される。

$$\frac{\eta_c}{\eta_{max}} = 0.35 \frac{H_c}{\eta_{max}} + 0.65 \quad \dots\dots\dots (12)$$

このように、堤体天端高が静水面に等しいときの波頂高は、無越波時の約 65% 程度にも達することがわかる。

次に、越波のあるときの波底高について検討する。無越波時の静水面からの波底高 η_{min} については (11) 式によって示された。また無越波時において重複波高が入射波高の 2 倍より大きくなるゆえんと考えられる波底高の増大は、入射波波形勾配が約 0.05 以上で約 10% 程度生ずるので、波頂高と同様に越波時の波底高 η_c を無越波時の波底高 η_{min} との比、 η_c/η_{min} で表わすすると前述の差だけオーダーが異なる結果となる。

そこで越波時と無越波時の波底高を直接比較することに着目して、それぞれの実験値の比、すなわち無越波時における波底高の平均値 $\bar{\eta}_{min}$ と越波時における波底高の実験値 η_c の比で表わしたものが図-5である。この結果は越波のある場合の波底高が堤高の変化に対してほぼ一定の波底高となることを表わしている。すなわち堤高が水面と同じか、それ以上の時は、無越波時の波底高とほぼ等しくなることを示している。

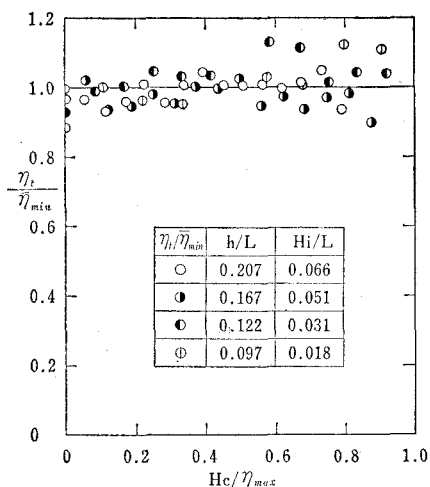


図-5 越波時の堤高と波底高の関係

4. 結 言

入射波が鉛直壁を越波する場合と無越波の場合における壁前面に生ずる重複波の水位変動について、実験的に検討してきたが、これらをまとめると次のようになる。

(1) 鉛直壁を入射波が越波しない場合においては、壁前面の重複波の波頂高に関する既往の有限振幅重複波理論の適合性について検討したが、その近似解は、実験結果を十分満足することができない。ただ合田式は、実験結果と比較的良好一致しているが、計算式が複雑で簡便でないこと、また波頂高と入射波波形勾配の関係が、相対水深をパラメーターとしてほぼ直線関係になることを考え合せるならば本実験結果から得られる非越波時の波頂高の実験式は、(8)式と定めることができる。

(2) 鉛直壁前面の重複波の碎波限界は、岸による理論式(4)式によって計算される限界の入射波波形勾配より若干小さい領域であることが認められた。そしてその領域までの非碎波領域における重複波の波頂高の実験結果は直線関係となる。

(3) 無越波時における重複波の波底高は、重複波の波頂高から波底高までの高さを入射波高の2倍と仮定すると(11)式から算定することができる。しかし入射波波形勾配が約0.05より大きくなると算定値よりも大きい実験結果が認められ、波頂高が入射波波形勾配で1様に増大することから、重複波高が、入射波高の2倍にならないゆえは、波底高の増大によるものであると考えられる。

(4) 鉛直壁を入射波が越波する場合の波頂高は、静水面上の堤体天端高に比例し、無越波時の波頂高で越波時の波頂高及び堤体天端高を無次元化して表わすと、(12)式に示す実験式が得られた。そして静水面と等しい堤体天端高の場合の波頂高は、無越波時のその約70%程度になることが認められた。

(5) 越波時の波底高は、静水面上の堤体天端高に関係なく、無越波時の波底高にほぼ等しくなることが認められた。すなわち、越波時における鉛直壁前面の重複波高は、静水面からの堤体天端高の増加とともに増大するが、波底高はほぼ一定で波頂高のみが増大するものと考えられる。

以上鉛直壁を入射波が越波する場合と無越波の場合についてその壁前面に生ずる重複波の水位変動に関する実験的な検討を行なったが、今後は、波頂高と越波量、波頂高と反射率として波頂高と伝達率などについての検討を加えたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太: 海岸堤防の設計, 特にその有効高について, 第2回海岸工学講演会講演集, pp. 57~70, 1955.
- 2) 永井莊七郎・玉井佐一・西村益夫: 重複波の発生条件と重複波の波圧, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 121~126, 1962.
- 3) 合田良実・竹田英章・菊谷 徹: 防波堤の所要天端高に関する実験(1), 直立堤の越波による伝達波高, 第2回港湾技術研究所発表会講演概要, pp. 1~7, 1962.
- 4) 合田良実・柿崎秀作: 重複波における双峯型波圧の出現について, 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 99~105, 1965.
- 5) 合田良実・柿崎秀作: 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻10号, 1966.
- 6) 土屋義人・山口正隆: せつ動解による有限振幅重複波理論の適用限界について, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 7~13, 1969.
- 7) 土木学会海岸工学委員会: 海岸保全施設設計便覧改訂版, 土木学会, pp. 36~38, 1969.
- 8) 土屋義人・山口正隆: 越波のある場合の重複波の特性について, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 79~84, 1970.
- 9) 合田良実・吉村知司・福森利夫: 碎波移行領域における波圧の変化に関する実験, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 209~214, 1971.
- 10) 高田 彰: 波の遡上越波および反射の関連性について(第3報), 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 249~258, 1971.
- 11) 高田 彰: 有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No. 201, pp. 61~76, 1972.
- 12) 高田 彰: 波の打ち上げ空間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No. 212, pp. 25~39, 1973.
- 13) 三浦 晃・遠藤茂勝・落合 実: 重複波の水位変動特性について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 75~79, 1980.
- 14) 三浦 晃・遠藤茂勝: ブロック積防波堤の波高伝達特性, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 261~265, 1977.