

斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験

高山 知司*・永井 紀彦**・西田 一彦***・関口 忠志****

1. ま え が き

防波護岸の天端高を安全かつ合理的に決定するためには、護岸の越波流量特性を明らかにすることが重要である。現在に至るまで、越波流量特性の把握を目的とした不規則波を用いた2次元断面実験が、数多くの条件で実施されている^{1),2),3)}。しかし、現実の海の波は方向性を有しているため、入射波の波向が越波流量に与える影響を明らかにすることが、重要な課題として残されている。入射波の波向と越波流量との関係に関する定量的な評価は、Wassing⁴⁾、細井ら⁵⁾、井上ら⁶⁾、などによってなされてはいるものの、これらの研究はすべて規則波を用いたものであり、不規則波を用いた波入射角と越波流量との関係を求める3次元的な実験例は、まだ報告されていない。本研究は、斜め入射不規則波を用いた3次元的な越波流量測定実験を実施し、直立護岸およびブロック積み消波護岸に関して、波入射角と越波流量との関係を明らかにしたものである。

2. 実験および実験結果の解析法

2.1 実験水路と護岸模型

実験は、図-1に示す30m×4.3m×1.0mの不規則波造波水槽でおこなわれた。入射波の波向と護岸法線直角方向とのなす角として定義される波入射角 θ が、0°、15°、30°、45°、60°となるように幅4.3mの護岸模型を水槽内で移設した。水路側面と護岸との多重反射を低

減させるため、水路側面に消波碎石を設置した。図-2は護岸模型を示したものであるが、越波の採水は中央の幅60cmの部分でおこなった。ブロック積み消波護岸の模型としては、図-3に示すように、直立護岸の前面に480gのテトラポット模型を1:1の勾配で積んだものを用いた。写真-1に、実験の状況を示す。

2.2 実験波の解析

実験波としては、ブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを目標とした、有義波高10~15cm、沖波波形勾配0.007~0.04の不規則波を作用させた。容量式波高計で測定された波形は、データレコーダに収録された後、A/D変換され大型計算機を用いて統計処理された。この際、造波板と護岸の間に多重反射が発生することを考慮して、造波板から3m離れた水深一様部に40cm間隔で2台の波高計を設置した。これらの波形の同時記録を用いて入・反射波の分離計算⁷⁾をおこない入射波高を求めた。換算沖波波高 H_0 は、ここで求められた入射波高を波高計設置位置における浅水係数で除した値とした。図-4に4種類の実験波のスペクトル形状を示す。

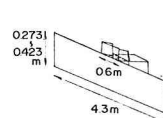


図-2 護岸模型

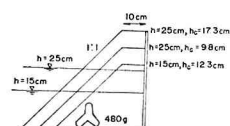


図-3 ブロック積み護岸

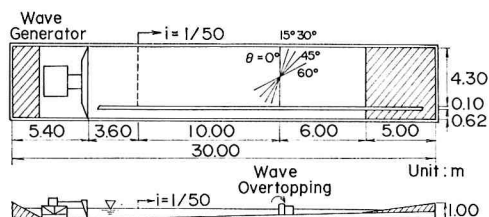


図-1 実験水路

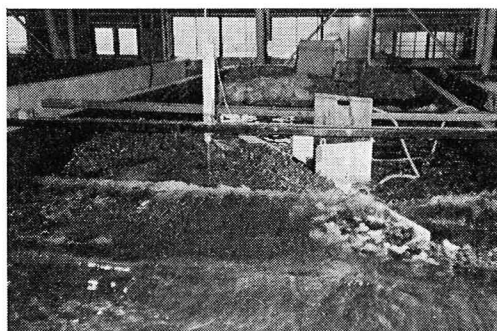


写真-1 実験状況

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所波浪研究室長
 ** 正会員 運輸省港湾技術研究所波浪研究室
 *** 正会員 前 運輸省港湾技術研究所波浪研究室
 **** 運輸省港湾技術研究所波浪研究室

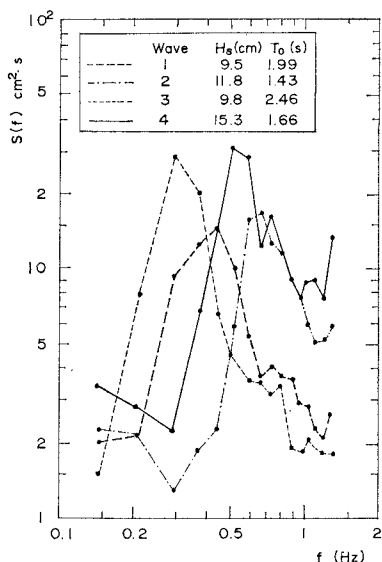
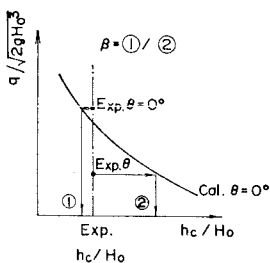


図-4 入射波のスペクトル形状

2.3 越波流量の解析

実験で測定された越波流量は、単位時間・単位幅当りの越波流量 q (cm²/s) を H_0 と重力加速度 g とで無次元化した無次元量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を用いて整理した⁹⁾。波入射角 θ の増大に伴う $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の減少量は、換算天端高係数 β を用いて所要天端高の比に換算した。ここに β は、同一越波流量になる場合の、斜め入射波に対する所要天端高と直角入射波に対する所要天端高との比として定義される量であり、 β が小さいほど越波流量の減少が顕著なことを意味している。越波流量を天端高に換算するにあたっては、著者らが提案した直立護岸の越波流量算定式を用いた¹⁾。

越波実験においては、越波流量を一定とするようにそれぞれの θ に対して天端高を調整することは容易ではないので、ここでは、図-5 に示すように、同一天端高に対する直角入射波と斜め入射波とに対する越波流量測定結果から β を求めた。図-5 は、横軸に H_0 で無次元化した天端高 h_c を、縦軸に $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を示し、著者らが提案した直立護岸の越波流量算定式から求まる縦軸と横軸の対応を曲線で示したものである。 β の値は $q/\sqrt{2gH_0^3}$

図-5 換算天端高係数 β の求め方

によって変化しないと仮定すれば、図-5 に示されるように、同一天端高に対する $q/\sqrt{2gH_0^3}$ をそれぞれ h_c/H_0 に換算すれば、 β は換算された h_c/H_0 の比として求められる。直立護岸の場合、 $\theta=0^\circ$ の実験値は曲線上にのべきではあるが、不規則波の波速のちがいなどによる影響によって若干曲線からはずれることになる。

2.4 換算天端高係数 β の算定における実験値の補正

表-1 は、本研究で得られた実験値を一覧表にとりまとめたものである。この実験値から β を算定するにあたっては、表-2 の解析例に示されるように、以下の補正をおこなった。

(1) 回折を考慮した H_0 の補正

図-1 に示したように護岸模型を設置したため、斜め入射波の場合には護岸両端からの回折波が発生する。そこで、越波採水位置における回折係数を、護岸の両側それぞれに関する半無限堤の回折係数の積と仮定して、 H_0 にこの係数を乗じた。島堤前面の波高が半無限堤の回折波の重ねあわせとしてよく近似されることは、高山⁹⁾ によって報告されている。

(2) サーフビートを考慮した護岸の水深と天端高の補正

実験水路におけるサーフビートおよび平均水位の上昇量は現地海岸よりも過大になるため、 H_0 で無次元化した護岸水深 h/H_0 を 0.1 だけ増加させ、護岸天端高 h_c/H_0 を 0.1 だけ減少させて実験結果を補正した。この補正は合田⁹⁾ にならったものである。

(3) H_0 の相違を考慮した $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の補正

β を算定するためには、図-5 に示したように同一の h_c/H_0 に対する $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の相違を調べなければならないので、表-2 に示されるように波向 θ を変化させた一連の実験結果の解析には、 H_0 の平均値を用いた。そこで、直立護岸の越波流量算定式を用いて、実験条件近傍では $q/\sqrt{2gH_0^3}$ は H_0 の何乗に比例するかを調べ $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を補正した。(表-2 の例では $n=0.9$ 乗)

3. 実験結果

表-1 に示した実験結果を表-2 の例に示すようにとりまとめて、 β を求めた結果を図-6 から図-9 に示す。

図-6 は、横軸に実験条件としての h_c/H_0 を、縦軸には直角入射時の直立護岸に関して実験で得られた $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を越波流量算定式から h_c/H_0 に換算した値を示し、両者を比較したものである。両者は本来一致すべきものではあるが、不規則波の波速のちがいによる影響などのために、完全には一致しない。縦軸と横軸は $\pm 20\%$ の範囲内で一致することを著者⁹⁾ は前に示したが、図-6 においても両者は $\pm 20\%$ の範囲でほぼ一致している。したがって本実験値は、従来の断面越波実験値と

矛盾していないことがわかる。

図-7 は、直立護岸に関して、直角入射時を基準とした斜め入射時の換算天端高係数 β を、波入射角 θ との関係で示したものであり、横軸には $\sin \theta$ を、縦軸には β を示し、実験値を沖波波形勾配 H_0/L_0 別にプロットしたものである。図中の折れ線は、 H_0/L_0 別に実験値の平均値を結んだものである。 θ が 0° から 30° にかけての β の平均値は、 $H_0/L_0=0.007, 0.012, 0.04$ それぞれに対応して、1.0 から 0.84, 0.71, 0.55 に減少している。すなわち、 H_0/L_0 が大きいほど、 θ の増加に伴う β の減

少が顕著になっている。 $\theta=45^\circ, 60^\circ$ で β が若干大きめの値になっているのは、水槽側面からの波の再反射によるものである。この傾向は、反射率の大きい H_0/L_0 が小さいケースほど顕著である。 $\theta=0^\circ$ から 30° にかけては、 β は $\sin \theta$ にほぼ比例して減少している。

図-8 は、直角入射時における直立護岸とブロック積み消波護岸の越波流量を比較し、ブロック積み消波護岸の換算天端高係数を求めたものである。横軸には無次元護岸設置水深 h/H_0 を、縦軸には β を示している。実験値のプロットは、図-6 や 図-7 と同様に波形勾配別

表-1 実験結果一覧表 (2つの波群に対する平均値)

実験条件	護岸	波入射角	Wave No. 1 有義波周期 $T_0=2.32$ s		Wave No. 2 有義波周期 $T_0=1.41$ s		Wave No. 3 有義波周期 $T_0=2.85$ s		Wave No. 4 有義波周期 $T_0=1.71$ s	
			有義波高 H_0 (cm)	越波量 q (cm ² /s)	有義波高 H_0 (cm)	越波量 q (cm ² /s)	有義波高 H_0 (cm)	越波量 q (cm ² /s)	有義波高 H_0 (cm)	越波量 q (cm ² /s)
護岸水深 $h=15$ cm	直立	0°	9.8	7.5	12.3	3.7	9.1	7.1	16.3	7.6
		15	8.9	4.5	11.3	1.3	8.3	3.9	16.3	4.2
		30	8.4	3.0	11.4	0.76	8.2	2.5	15.9	3.0
		45	8.6	2.0	11.2	1.3	8.3	3.9	16.1	2.9
		60	8.9	0.78	10.3	0.15	9.2	1.1	15.3	1.8
	消波	0°	8.8	0.47	11.2	0.02	8.7	0.63	16.1	0.84
		15	8.8	0.18	11.3	0.01	8.3	0.13	16.1	0.12
		30	8.8	0.03	11.2	0	8.3	0.01	16.2	0.01
		45	9.0	0.04	10.2	0	9.3	0.29	15.4	0.16
		60	8.9	0	10.6	0	9.2	0	15.1	0.01
$h=25$ cm $h_c=9.8$ cm	直立	0°	12.7	23.4	15.8	22.3	12.1	25.7	20.3	48.5
		15	10.7	7.8	13.9	4.7	10.1	8.8	19.1	26.4
		30	10.1	5.9	13.3	3.0	9.8	6.4	19.1	16.3
		45	10.3	5.8	13.3	7.8	9.6	7.0	18.8	27.8
		60	10.5	4.3	12.0	2.9	10.6	7.2	17.6	14.0
	消波	0°	—	4.6	—	1.1	—	8.5	—	8.1
		15	10.4	2.5	13.7	0.38	10.1	4.0	19.0	4.0
		30	10.1	1.8	13.1	0.08	9.6	2.4	19.0	2.0
		45	10.4	1.5	12.0	0.15	10.3	3.4	17.8	3.7
		60	10.3	0.73	11.8	0.10	10.5	2.3	17.4	2.3
$h=25$ cm $h_c=17.3$ cm	直立	0°	14.0	13.4	16.1	6.2	12.5	13.9	20.8	18.2
		15	10.6	1.7	13.7	0.58	9.9	2.4	19.0	5.9
		30	10.3	1.1	13.1	0.30	9.8	1.3	19.5	4.4
		45	10.3	1.2	13.1	1.2	9.7	1.9	19.2	4.4
		60	10.7	0.40	12.0	0.04	10.6	1.5	18.0	3.6
	消波	0°	11.0	0.30	13.7	0.03	10.2	0.73	19.9	0.81
		15	10.4	0.01	13.3	0	9.9	0.12	19.4	0.05
		30	10.3	0.04	13.2	0	9.8	0.19	19.4	0.10
		45	10.5	0	12.2	0	10.6	0.05	18.1	0.07
		60	10.5	0	11.9	0	10.6	0	17.8	0

表-2 実験結果の整理例

WAVE No. 4 $T_0=1.71$ s $L_0=4.56$ m															
実験条件	護岸	θ (deg)	測定値		回折補正 H_0 (cm)	平均波高 と無次元 実験条件	$q/\sqrt{2gH_0^3}$ $X \times 10^{-9}$		n $q/\sqrt{2gH_0^3} \propto H_0^n$	波高補正 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ $X \times 10^{-9}$		換算天端高 (h_c/H_0)CAL	β 直立護 岸波向 効果	β 消波ブ ロック の效果	β 消波護 岸波向 効果
			H_0 (cm)	q (cm ² /s)											
$h=15$ cm $h_c=12.3$ cm	直	0	16.3	7.6	16.0	$H_0=16.6$ cm	2.5	3	0.9	2.6	3	0.59	1.0		
		15	16.3	4.2	16.0		1.4	3		1.4	3	0.74	0.80		
		30	15.9	3.0	16.9		1.0	3		9.9	4	0.84	0.70		
		45	16.1	2.9	18.5		9.7	4		8.8	4	0.87	0.68		
		60	15.3	1.8	15.9		6.0	4		6.2	4	0.96	0.61		
	消波	0	16.1	0.84	15.8	(サーフビ →補正) $h/H_0=1.00$	2.8	4		2.9	4	1.16	0.51	1.0	
		15	16.1	0.12	15.8		4.0	5		4.2	5	1.64			
		30	16.2	0.01	17.2		3.3	6		3.2	6	2.24			
		45	15.4	0.16	17.7		5.3	5		5.0	5	1.60			
		60	15.1	0.01	15.9		3.5	6		3.5	6	2.22			
波					$h_c/H_0=0.64$										

におこなっている。本実験の範囲は、 $1.0 < h/H_0 < 2.5$ であり、斜面上の波の変形を考慮すると、Breaking 領域に護岸が設置されていることになる。著者ら²⁾は、合田²⁾による断面越波実験結果をもとに、Breaking 領域におけるブロック積み消波護岸の換算天端高係数は約 0.65 であると述べた。しかし、図-8 では β は 0.3 から 1.0 の範囲に広く分布しているの、消波ブロックの越波流量減少効果に関しては、今後とも検討が必要である。 β の値は h/H_0 に対しては変化の傾向は明らかではないが、 H_0/L_0 が小さいほど大きな値になる傾向が図-8 に見られる。

図-9 は、ブロック積み消波護岸に関して、図-7 と同様に θ の増加に伴う β の減少を示したものである。 $\theta = 0^\circ$ から 30° にかけては、図-7 と同様に β は $\sin \theta$ にほぼ比例して減少する。 $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ で β が若干大きな値になっているが、この傾向は図-7 ほど顕著では

ない。これは、護岸が消波構造であるために、護岸と水槽側面との間の多重反射は直立護岸より弱くなるからである。ブロック積み消波護岸に関しては、直立護岸とは異なり θ の増加に伴う β の減少は、 H_0/L_0 の影響を強く受けてはいない。

4. 考 察

従来、入射波のエネルギーの観点から、波入射角 θ の影響によって越波流量は $\cos \theta$ 倍あるいは $(\cos \theta + 1)/2$ 倍になると説明されている^{4),5),6)}。しかし、図-7 および図-9 に見られるように、本実験結果は、 θ の増加に伴う β の減少は $\cos \theta$ ではなく $\sin \theta$ に比例する傾向を示している。

図-10 は、波入射角 θ で反射率 1.0 の護岸に波が入射したときの入・反射波の波峰線を示したものである。下の図は上の図に対応する護岸前面の水位分布を示しているが、ここでは正弦波の波形を仮定している。波が斜め

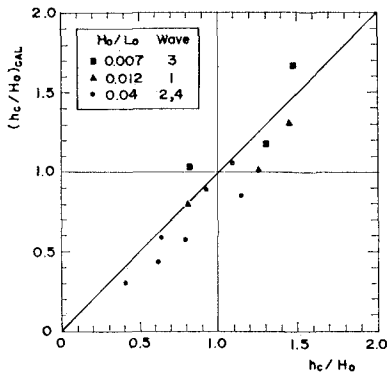


図-6 直立護岸の越波流量算定式との適合

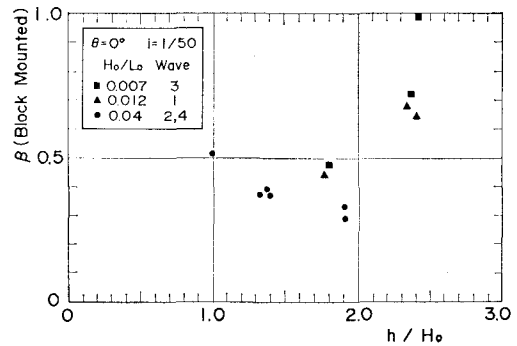


図-8 直角入射時のブロック積み護岸の換算天端高係数

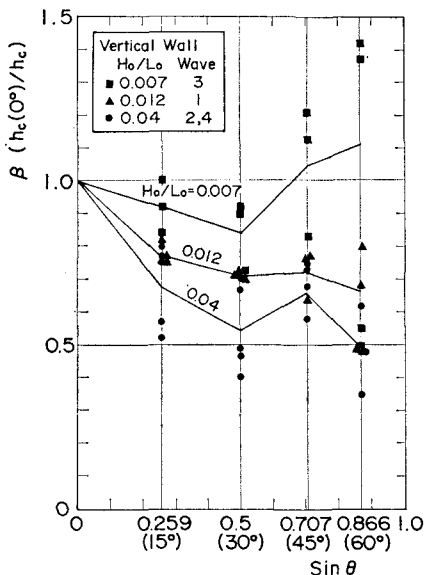


図-7 直立護岸の入射角と換算天端高係数

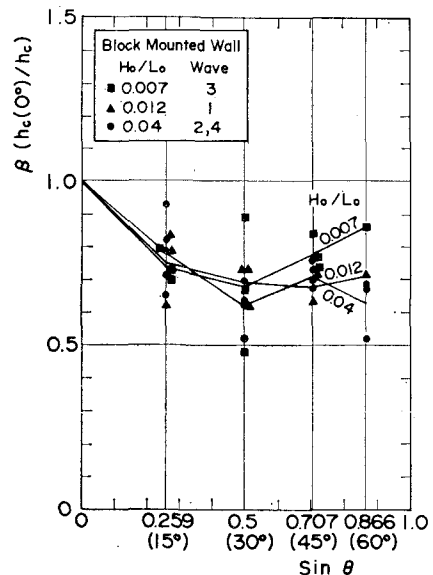


図-9 ブロック積み護岸の入射角と換算天端高係数

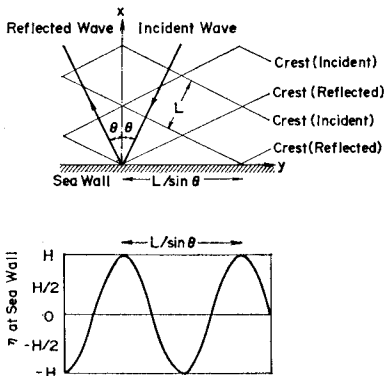


図-10 斜め入射波の護岸前面での水面形状

から入射する場合、写真-1に示されるように、護岸全面で同時に越波がおこるわけではないので、天端高を越える水のすべてが越波するわけではなく、越波せずに護岸法線方向へ向う流れが生ずる。この流れの量は、図-10に示す護岸法線方向への水面勾配 $(H/L) \sin \theta$ によって決まると考えられる。

次に、図-10における重複波の護岸前面の法線方向の水粒子速度を考える。入射波および反射波の速度ポテンシャル ϕ_I および ϕ_R は、それぞれ次式で示される。

$$\phi_I = A \sin \{-k(\cos \theta)x - k(\sin \theta)y - \sigma t\} \quad \dots (1)$$

$$\phi_R = A \sin \{k(\cos \theta)x - k(\sin \theta)y - \sigma t\} \quad \dots (2)$$

ここに、 k は波数 $(2\pi/L)$ 、 σ は角周波数 $(2\pi/T)$ である。 A は、波高 H 、重力加速度 g 、水深 h 、および静水面を基準とした上向きを正とする鉛直座標 z によって、次式のように示される。

$$A = gH \cosh k(h+z) / (2\sigma \cosh kh) \quad \dots (3)$$

したがって、護岸法線方向の水粒子速度は、次式のように計算される。

$$\frac{\partial}{\partial y}(\phi_I + \phi_R)|_{y=0} = -2Ak(\sin \theta) \cos \{-k(\sin \theta)x - \sigma t\} \quad \dots (4)$$

すなわち、護岸法線方向への水粒子速度は $\sin \theta$ に比例する。

石原ら¹⁰⁾は、護岸法線方向への水粒子の運動のために、波入射角が大きいほど越波量が減少すると指摘して

いる。この指摘は、波入射角の影響は $\sin \theta$ によって決まるとするここでの考え方と一致している。すなわち、斜め入射による越波流量の減少は、主として越波せずに護岸法線方向へ向う水の流れによって生じ、これによる β の減少は $\sin \theta$ に比例する傾向になると結論づけられる。

5. 結 語

斜め入射不規則波を用いた越波実験を実施し、波入射角 θ の増大に伴う換算天端高係数 β の減少は、 $\cos \theta$ ではなく $\sin \theta$ に比例する傾向があることが判明した。直立護岸では θ の増加に伴う β の減少は沖波波形勾配が大きいほど顕著であるが、ブロック積み消波護岸では沖波波形勾配の影響は直立護岸ほど顕著ではなかった。

なお、港湾技術研究所合田良実次長から有益な御助言をいただいたことをここに示し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 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巻第2号，pp. 151~205, 1982.
- 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巻第4号，pp. 3~45, 1975.
- 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.
- Wassing, F.: Model Investigation on Wave Run-up Carried out in the Netherlands during the past Twenty Years, Proc. of 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 700~714, 1958.
- 細井正延・首藤伸夫：堤防に斜めに波が入射する場合のうちあげ高について，第9回海岸工学講演会講演集，土木学会，pp. 149~152, 1962.
- 井上雅夫・土屋義人：斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験的研究，第18回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 259~264, 1971.
- 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.
- 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巻第4号，pp. 1~41, 1970.
- 高山知司：波の回折と港内波高分布に関する研究，港湾技研資料 No. 367, 140 p., 1981.
- 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏：海岸堤防の越し波防止効果について，第4回海岸工学講演会講演集，土木学会，pp. 99~109, 1957.