

傾斜護岸への相対水深を考慮した波の打ち上げ高さの一推定法

加藤悠司¹・高橋敏彦²・新井信一³

海底勾配 1/20 上に, 1/0.5 と 1/3 傾斜護岸を設置し, 不規則波を用いて相対水深の違いによる波の打ち上げ高さの実験を行った。その結果, 勾配や相対水深に関わらず代表打ち上げ高さ間の関係は, Longuet-Higgins が示した代表波高間の関係式にはほぼ対応することが認められた。また, 1/3 最大打ち上げ高さ $R_{1/3}$ を, 1/0.5 及び 1/3 勾配毎に相対水深 h_i/L_0 = 0.00~0.05 までの範囲で沖波有義波高 ($H_{1/3}$)₀' を用いて求めることができる実験式を示した。その計算値と実験値の誤差は, ほぼ 25% 以内でよく対応する。更に, $R_{1/3}$ の実験式を基に, 任意の沖波波高に対する各代表打ち上げ高さを代表波高間の関係式を用いて推定する方法を提案した。

1. はじめに

傾斜堤や護岸等を築造する場合, 背後地や砂浜地, 海底勾配等様々な条件により, 堤脚が海中に設置されるケースも少なくない。また, 陸上に設置した場合でも, 侵食により堤脚が海中に没する場合もある。そこで護岸の設計, 施工及び管理を行うに至っても相対水深を考慮することが重要となってくる。しかし, 相対水深が波の打ち上げ高さに及ぼす影響に関しては, 規則波について豊島ら (1964, 1965), 高田 (1975), 豊島 (1987) によって打ち上げ高算定図が作成されるなど検討が行われてきたが, 不規則波によるそれらの影響に関しては間瀬らが非碎波の場合 (2003a) や堤脚水深が浅い場合 (2003b) について研究を行っているのみで, ほとんど検討されていない。そこで本研究は, 傾斜護岸の中で現場に多く築造されている急傾斜堤 1/0.5 勾配と緩傾斜堤 1/3 勾配 (間瀬ら, 2003b) を対象として, 不規則波を用いて相対水深の違いによる波の打ち上げ高さの特性を実験的に検討するとともに, 代表入射波高と代表打ち上げ高さの関係を明らかにし, 沖波有義波高から傾斜堤の相対水深を考慮した代表打ち上げ高さを推定する方法について検討を行った。

2. 実験条件及び実験方法

実験水路は, 長さ 20.0 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.7 m の両面ガラス張りの造波水路を二分し, 片側 0.3 m として両側の水路を使用した。水路の一端にはピストン型反射波吸収制御付き不規則波造波装置, 他端には合板で 1/20 勾配を作成し, その上に模型堤体を設置した。模型堤体の法勾配は, 1/0.5 と 1/3 の 2 種類とし, 滑面で実験を行った。実験は, 一樣部水深 $h=24.4\sim44.0$ cm,

有義波周期 $T_{1/3}=1.34$ s, 有義波波高 $H_{1/3}=1.0\sim10.0$ cm, 堤脚位置における相対水深 h_i (堤脚水深: 堤体のり先から鉛直上方を +, 下方を - とした)/ L_0 (沖波波長) = -0.02~0.05 迄の 0.01 刻みに 8 ケースである。入射波高, 反射波高の算定には合田の入射波分離法を用いた。波の打ち上げ高さは, 目視観測を主として, ビデオカメラ観測を副とし, 波が最も高く打ち上がった部分を読み取った。週上波は 1~120 波目を読み取り, 11~110 波目の値を用いて解析を行った。不規則波は, Bretschneider・光易型のスペクトルをもつ波を用いた。図-1 に模型堤体概略図, 表-1 に実験条件を示す。

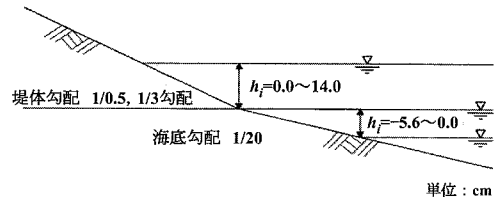


図-1 模型堤体概略図

表-1 実験条件

実験 No.	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	h_i (cm)	h_i/L_0	h (cm)
1/0.5 勾配	1.34	1.0	-5.60	-0.02	24.40
			-2.80	-0.01	27.20
			0.00	0.00	30.00
			2.80	0.01	32.80
			5.60	0.02	35.60
			8.40	0.03	38.40
			11.20	0.04	41.20
			14.00	0.05	44.40
1/3 勾配	1.34	10.0	-5.60	-0.02	24.40
			-2.80	-0.01	27.20
			0.00	0.00	30.00
			2.80	0.01	32.80
			5.60	0.02	35.60
			8.40	0.03	38.40
			11.20	0.04	41.20
			14.00	0.05	44.40

1 正会員 修(工) 国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所 (前東北工業大学大学院生)
2 正会員 博(工) 東北工業大学教授工学部建設システム工学科
3 正会員 工博 東北工業大学教授工学部建設システム工学科

3. 実験結果及び考察

(1) 不規則波と規則波による波の打ち上げ高さの比較

図-2(a), (b)は, $1/0.5$ 勾配及び $1/3$ 勾配における $h_i/L_0=0.02$ のケースの不規則波と規則波の実験結果をプロットしたものである。縦軸は相対打ち上げ高さ R/H_0' {規則波, R : 静水面からの波の鉛直打ち上げ高さ, H_0' : 換算沖波波高}, $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$ {不規則波, $R_{1/3}$: $1/3$ 最大打ち上げ高さ, $(H_{1/3})_0'$: 換算沖波有義波高}, 横軸は沖波波形勾配 H_0'/L_0 である。比較のために, $1/20$ 海底勾配の上に模型堤体を設置した豊島ら (1965) の滑面に対する規則波実験曲線も併記している。図-2より, 本実験の不規則波と規則波の相対打ち上げ高さの比較してみると, 同程度か幾分不規則波の相対打ち上げ高さの方が大きい値を示している。不規則波の実験値は, 豊島らの実験曲線と比較すると, 幾分大きい値を示したり, 小さい値を示したりしているが, H_0'/L_0 が大きい場合, 全体的に不規則波の $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$ が大きい値を示す傾向が認められた。なお, ここでは示していないが

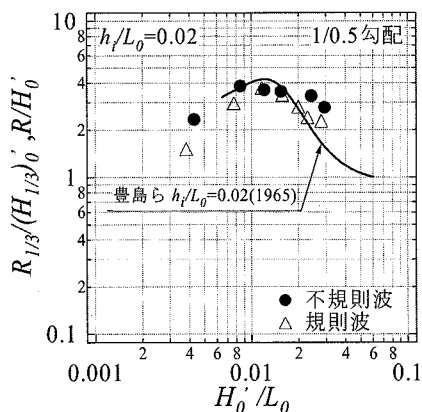


図-2(a) H_0'/L_0 と $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$, R/H_0' の関係 (1/0.5 勾配: $h_i/L_0=0.02$)

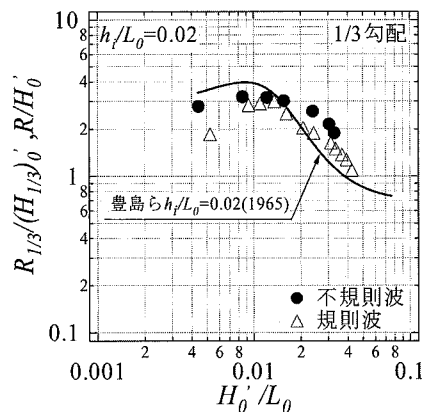


図-2(b) H_0'/L_0 と $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$, R/H_0' の関係 (1/3 勾配: $h_i/L_0=0.02$)

$h_i/L_0=-0.01$, -0.02 のケースでは, 堤体まで波がほとんど遡上せず, 海底勾配 $1/20$ の波の打ち上げとなっている。

(2) 入射波代表波高の検証

図-3, 4 は, $1/3$ 勾配における $h_i/L_0=0.04$ 及び $1/0.5$ 勾配における $h_i/L_0=0.04$ のケースにおいて, 入射波の代表波高として H_{mean} (平均波高) と $H_{1/3}$ (有義波高), $H_{1/3}$ と H_{max} (最大波高) の関係を順に示したものである。図-3 より, H_{mean} と $H_{1/3}$ 間のばらつきは小さく, $H_{1/3}=1.60 \cdot H_{mean}$ の関係が認められた。図-4 より, $H_{1/3}$ と H_{max} 間は, 波高が小さいところで幾分ばらつきが見られるが, $H_{max}=1.54 \cdot H_{1/3}$ の関係が認められた。波高の分布が Rayleigh 分布に従うとして, Longuet-Higgins (1952) が確率計算によって求めた代表波高間の関係 $H_{1/3}=1.60 \cdot H_{mean}$, $H_{max}=1.53 \cdot H_{1/3}$ (H_{max} に対する波高比については, 度数分布のピークすなわち mode (最多値) を, N (波の観測個数) = 100 とした場合で計算したもので示している) と比較すると同程度の値となっている。

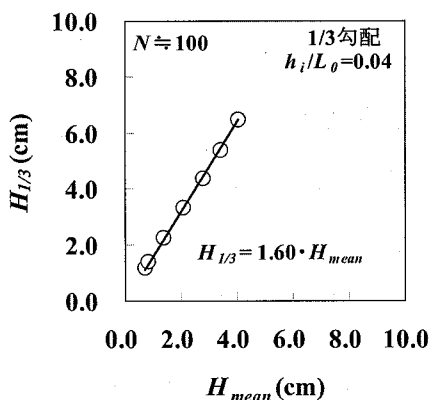


図-3 H_{mean} と $H_{1/3}$ の関係

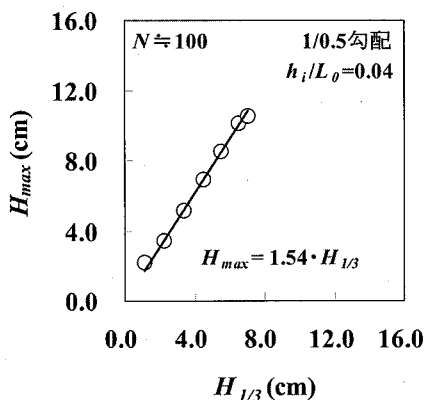
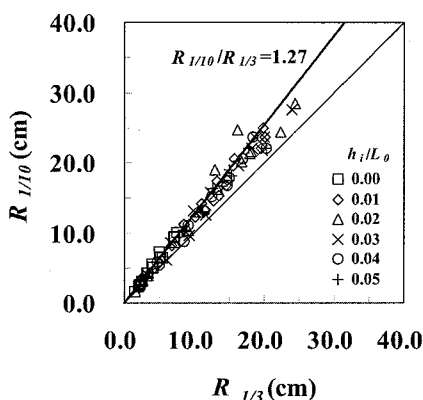
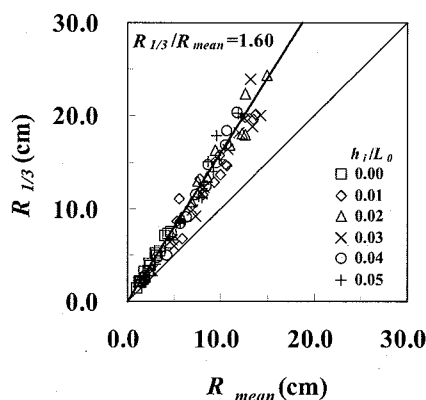


図-4 $H_{1/3}$ と H_{max} の関係

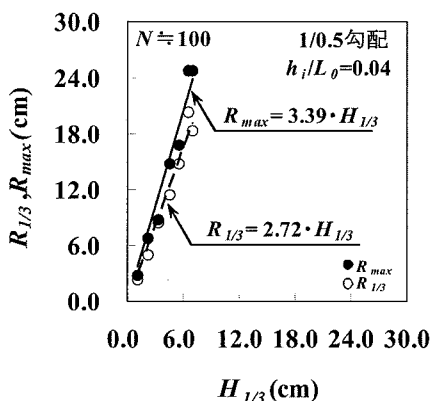
図-5 $R_{1/3}$ と $R_{1/10}$ の関係 (両勾配: $h_i/L_0=0.00\sim0.05$)図-6 H_{mean} と $H_{1/3}$ の関係 (両勾配: $h_i/L_0=0.00\sim0.05$)

(3) 代表打ち上げ高さの検証

図-5, 6 は, 両勾配において $h_i/L_0=0.00\sim0.05$ の 6 ケースで, それぞれ $R_{1/3}$ と $R_{1/10}$ (1/10 最大打ち上げ高さ) 及び R_{mean} (平均打ち上げ高さ) と $R_{1/3}$ の関係を示したものである。図中の実線は, Longuet-Higgins が示した代表波高間の理論関係を, 各代表打ち上げ高さに当てはめて関係式を表したものである。両図より, 勾配や相対水深に関わらず代表打ち上げ高さ間の関係においても代表波高間の関係式とほぼ対応することが認められる。これらの傾向は, Mase ら (2004) {堤体勾配 1/0.5 および 1/3, 堤脚水深 3 ケース} による実験結果と同様である。

(4) 代表打ち上げ高ささと代表波高の関係

図-7 は 1/0.5 勾配における $h_i/L_0=0.04$ のケースでの, $H_{1/3}$ と $R_{1/3}$, $H_{1/3}$ と R_{max} (最大打ち上げ高さ) の関係を示したものである。入射波高と波の打ち上げ高さ間の関係は, 入射波のみ及び波の打ち上げ高さのみの代表波高間の関係よりもばらつきは大きい, 有義入射波高に対する 1/3 及び最大打ち上げ高さの関係式は, $R_{1/3}=2.72 \cdot H_{1/3}$ 及び $R_{max}=3.39 \cdot R_{1/3}$ となる。

図-7 $H_{1/3}$ と $R_{1/3}$, R_{max} の関係

(5) 各代表波の関係

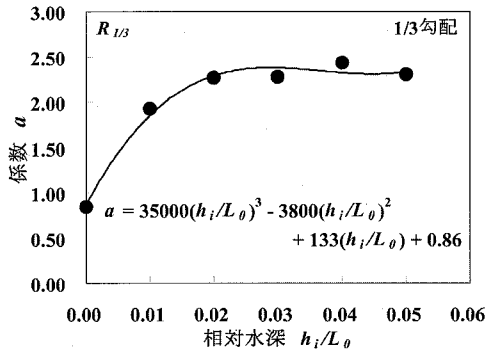
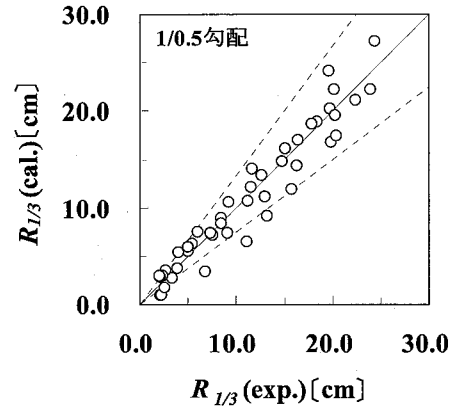
表-2 は, 各代表入射波高間の関係, 各代表打ち上げ高さ間の関係, 更に入射波高と打ち上げ高さの各代表波高間の関係を, 1/3 勾配における $h_i/L_0=0.04$ のケースで一例を示したものである。なお, 表中には $(H_{1/3})_0'$ と各代表打ち上げ高さの関係も示してある。各関係は, 上述したように一次式でよく対応している。

表-2 各代表波の関係 (1/3 勾配: $h_i/L_0=0.04$)

	H_{mean}	$H_{1/3}$	$(H_{1/3})_0'$	$H_{1/10}$	H_{max}	R_{mean}	$R_{1/3}$	$R_{1/10}$	$R_{2\%}$	R_{max}
H_{mean}	—	0.626	—	0.499	0.405	0.361	0.234	0.194	0.160	0.151
$H_{1/3}$	1.60	—	—	0.796	0.647	0.575	0.373	0.309	0.255	0.241
$H_{1/10}$	2.00	1.26	—	—	0.813	0.722	0.469	0.388	0.320	0.302
H_{max}	2.46	1.54	—	1.23	—	0.877	0.576	0.476	0.394	0.372
R_{mean}	2.76	1.73	1.58	1.37	1.12	—	0.648	0.536	0.445	0.421
$R_{1/3}$	4.25	2.66	2.43	2.12	1.72	1.54	—	0.827	0.685	0.646
$R_{1/10}$	5.14	3.22	2.94	2.56	2.08	1.86	1.21	—	0.828	0.781
$R_{2\%}$	6.18	3.87	3.53	3.08	2.50	2.25	1.45	1.20	—	0.946
R_{max}	6.50	4.07	3.72	3.23	2.64	2.37	1.53	1.27	1.06	—

表-3 $R_{1/3}$ を求める実験式

勾配	関係式	係数 a	範囲
1/0.5	$R_{1/3} = a \cdot (H_{1/3})_0'$	$a = 82,000(h_i/L_0)^3 - 8,600(h_i/L_0)^2 + 254(h_i/L_0) + 0.81$	$0.00 < h_i/L_0 < 0.05$
1/3		$a = 35,000(h_i/L_0)^3 - 3,800(h_i/L_0)^2 + 133(h_i/L_0) + 0.86$	

図-8 h_i/L_0 と係数 a の関係の一例 [$R_{1/3}$]
(1/3 勾配: $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$)図-9 $R_{1/3}$ の実験値と計算値の比較
(1/0.5 勾配: $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$)

4. 相対水深を考慮した波の打ち上げ高さに関する推定法の検討

(1) $R_{1/3}$ を求める実験式の係数 a の算出

表-2 より, 1/3 勾配における $h_i/L_0 = 0.04$ のケースでは $(H_{1/3})_0'$ に対する $R_{1/3}$ は $R_{1/3} = a \cdot (H_{1/3})_0'$ ($a: 2.43$) の関係にあることが認められる。図-8 は, この関係を 1/3 勾配で $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$ の範囲でプロットしたものである。縦軸は係数 a , 横軸は相対水深 h_i/L_0 である。図中の曲線は 3 次の多項式近似曲線である。同様に, 1/0.5 及び 1/3 勾配において, 1/3 最大打ち上げ高さ $R_{1/3}$ について係数 a をまとめると, 表-3 のようになる。

(2) 打ち上げ高さの実験値と実験式による計算値の比較

図-9, 10 は, 1/0.5 及び 1/3 勾配において $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$ の範囲で $R_{1/3}$ の実験値と計算値の比較を示したものである。図中の破線は誤差 25% を表している。図より 1/0.5 勾配においては, 1/3 勾配よりも全体的に幾分ばらつきは大きくなっている。両図より, $R_{1/3}$ が比較的小さい値で誤差 25% から外れているケースもあるが, 全体的にはほぼ対応していると思われる。

(3) Longuet-Higgins が示した代表波高間の関係式を用いた代表打ち上げ高さの推定

前述の 3. (3) で述べたように波の代表打ち上げ高さ間の関係も代表波高間の関係式に従うことから, Longuet-Higgins による代表波高間の関係 (表-4) を用いて, 代表打ち上げ高さを推定する。例えば R_{mean} を例にとると, $H_{mean} = 0.625 \cdot H_{1/3}$ の関係から $R_{mean} = 0.625 \cdot R_{1/3}$ を得る。ただし, $R_{1/3}$ は表-3 で示した実験式を用い

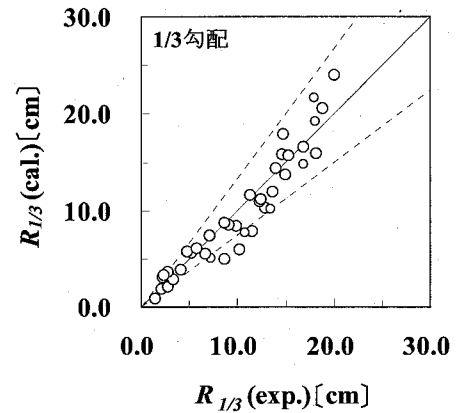
図-10 $R_{1/3}$ の実験値と計算値の比較
(1/3 勾配: $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$)

表-4 Longuet-Higgins による代表波高間の関係式

	$H_{1/3}$
H_{mean}	0.625
$H_{1/2}$	1.00
$H_{1/10}$	1.27
H_{95}	1.40
H_{max}	1.53

るものとする。図-11 は, 1/0.5 勾配において $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$ の範囲で, R_{mean} の計算値と実験値の比較を示したものである。図-12 は, 1/3 勾配において $h_i/L_0 = 0.00 \sim 0.05$ の範囲で, 上記と同様にして算出した R_{max} の計算値 ($R_{max} = 1.53 \cdot R_{1/3}$) と実験値の比較を示したものである。図-11 より, 比較的小さい値の一部で

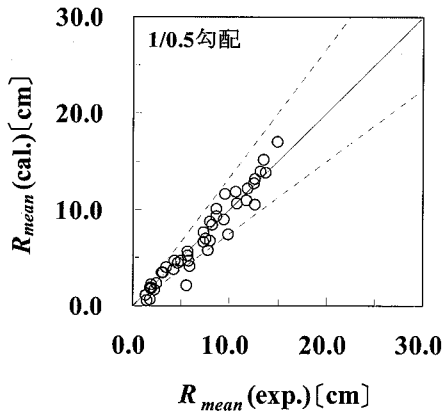


図-11 R_{mean} の実験値と計算値の比較
(1/0.5 勾配: $h_t/L_0 = 0.00 \sim 0.05$)

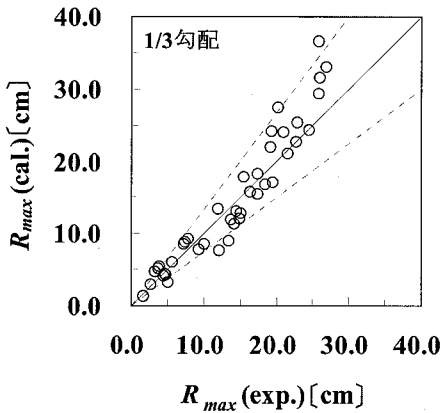


図-12 R_{max} の実験値と計算値の比較
(1/3 勾配: $h_t/L_0 = 0.00 \sim 0.05$)

差が大きくなるケースもあるが、ほとんどのケースで誤差 25% 以内となっており、よく対応していると思われる。また、図-12 の R_{max} の実験値と計算値は図-11 に示した R_{mean} の計算値と実験値の関係よりもばらつきが大きくなっている。しかし、 R_{max} は H_{max} と同様に計測中の一波に対応することなどから考慮すると、ほぼ対応しているものと思われる。

5. おわりに

本研究は、傾斜護岸の中で現場に多く築造されている

急傾斜堤 1/0.5 勾配と緩傾斜堤 1/3 勾配を対象として、不規則波を用いて相対水深の違いによる波の打ち上げ高さの特性を実験的に検討した。また、相対水深 $h_t/L_0 = 0.00 \sim 0.05$ までの範囲で任意の沖波有義波高から代表打ち上げ高さを推定する方法について検討を行った。その主な結果は次の通りである。

- (1) 本実験の不規則波の $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$ と規則波の相対打ち上げ高さ R/H_0' を比較した結果、勾配や相対水深に関わらず同程度か幾分不規則波の $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$ の方が大きい値を示した。また、豊島らの滑面に対する規則波実験曲線と比べて、 H_0'/L_0 が大きい場合、全体的に不規則波の $R_{1/3}/(H_{1/3})_0'$ が大きい値を示す傾向が認められた。
- (2) 代表打ち上げ高さ間の関係は、勾配や相対水深に関わらず代表波高間の関係とほぼ一致した。
- (3) 両勾配とも実験式を用いて算出した $R_{1/3}$ の計算値と実験値の誤差は、ほぼ 25% 以内でよく対応する。
- (4) $R_{1/3}$ の実験式を基に、任意の沖波波高に対する各代表打ち上げ高さを Longuet-Higgins が示した代表波高間の関係式を用いて推定できる。

参考文献

- 高田 彰(1975): 規則波の打上げ高及び越波量の定式化について, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 377-386.
- 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏(1964): 海岸堤防への波の打ち上げ高-海底勾配 1/30 -, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 260-265.
- 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏(1965): 海岸堤防への波の打ち上げ高-海底勾配 1/20 -, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp. 180-185.
- 豊島 修(1987): 緩傾斜護岸工法, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 447-451.
- 間瀬 肇・Torry S. Hedges・Mohamed Shareef・永橋 俊二(2003a): 波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定法に関する研究, 海岸工学論文集 第 50 巻, pp. 636-640.
- 間瀬 肇・宮平 彰・桜井秀忠・井上雅夫(2003b): 汀線近傍の護岸への不規則波の打上げに関する研究-算定打上げ高と不規則波の代表打ち上げ高の関係-, 土木学会論文集, No. 726/II-62, pp. 99-107.
- Longuet-Higgins, M.S. (1952): On the statistical distributions of sea waves, Jour. Marine Res, Vol. XI, No. 3, pp. 245-266.
- Mase, H., A. Miyahira and T. S. Hedges (2004): Random wave runup on seawalls near shorelines with and without artificial reefs, Coastal Engineering Journal, Vol. 46 No. 3, pp. 247-268.