

不規則波による傾斜護岸への波の打ち上げ高さに関する研究

(A STUDY ON WAVE RUN-UP HEIGHT ON SLOPING

REVETMENTS BY IRREGULAR WAVES)

斎藤 裕平 (Yuhei Saito)

The water depth at the toe of a slope greatly influences the wave run-up height on a sloping revetment. Accordingly, it is important to consider the water depth at the toe of the slope in the design, construction and administration of sloping revetments. However, there are almost no studies on the wave run-up height with focus on the water depth at the toe of the slope in the case of irregular waves. Therefore, wave run-up height by the difference in water depth at the toe of the slope was tested using irregular waves. Design guidelines for wave run-up height include the modified hypothetical slope method and the wave run-up diagram of Toyoshima et al., but both methods are for regular waves. The characteristic wave run-up height by both methods was examined from the effect of water depth at the toe of the slope. In addition, the relationships between representative wave run-up heights of irregular waves and wave run-up heights by both methods were clarified. The relationship between representative wave run-up heights of irregular waves was also examined. When the water depth at the toe of the slope increased, the value calculated by the modified hypothetical slope method underestimates that calculated by the diagram of Toyoshima et al. and the representative wave run-up height of irregular waves. The relationship between representative wave run-up heights of irregular waves may almost correspond to the relational expression between representative wave heights reported Longuet-Higgins.

1. はじめに

護岸への波の打ち上げ高さには、法先水深が大きく影響する。護岸の設計、施工及び管理を行う際には、法先水深を考慮することが必要になってくる。規則波については、豊島ら¹⁾²⁾、高田³⁾によって法先水深を考慮した検討が行われてきた。一方、不規則波の打ち上げ高さについては間瀬ら⁴⁾⁵⁾や玉田ら⁶⁾の研究があるが、法先水深の影響に関してはそれほど検討されていない。現在、波の打ち上げ高さの設計指針として改良仮想勾配法⁷⁾や豊島ら⁸⁾の算定図等がある。しかし、両方法とも規則波を対象としている。改良仮想勾配法は砕波水深を考慮しているとはいえ、法先水深が十分考慮されているとはいえない。そこで本研究は、傾斜護岸の中で比較的多く築造されている 1/3 勾配を対象とし、設計指針として用いられている両方法の波の打ち上げ高さの関係や特性を法先水深に着目して検討するとともに、不規則波の代表打ち上げ高さとの

関係を明らかにする。また、加藤ら⁹⁾は、Longuet-Higgins¹⁰⁾が示した不規則波の代表波高 H_x 間の関係式を用いて、波の代表打ち上げ高さ R_x 間においてもほぼ従うことを示唆している。そこで 1/3 最大打ち上げ高さ $R_{1/3}$ 等から、代表打ち上げ高さ R_x 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 20.0m、幅 0.6m、高さ 0.7m の両面ガラス張りの造波水路を 2 分し、幅 0.3m として使用した。水路には 1/20 の海底勾配を作成し、その上に滑面で 1/3 勾配の模型堤体を設置した。実験は、一様水深部 $h=24.4\sim44.0\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.34\text{s}$ 、有義波高 $H_{1/3}=1.0\sim10\text{cm}$ 、相対水深 $h_i(\text{法先水深})/L_0(\text{沖波波長})=-0.02\sim0.05$ 迄の 0.01 刻みに 8 ケースである。法先水深 h_i は、鉛直上方向を+、下方向を-とした。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

Figure 1 is a schematic diagram of the cross-section of the experimental model. It shows a dam structure on the left and a seabed on the right. The dam body is labeled "堤体勾配" (Dam body slope). The water level is indicated by a horizontal line with a triangle symbol. The seabed is indicated by a horizontal line with a triangle symbol. The vertical distance between the water level and the seabed is labeled $h_i = 0.0 \sim 14.0$. The slope of the seabed is labeled "海底勾配 1/20". The slope of the dam body is labeled "1/3 勾配". The unit is given as "単位: cm" (Unit: cm).

表-1 実験条件

実験No.		$T_{1/3}(\text{sec})$	$H_{1/3}(\text{cm})$	$h_1(\text{cm})$	h/L_0	$h(\text{cm})$
1/3勾配	A-1	1.34	1.0 ~ 10.0	-5.60	-0.02	24.40
	A-2			-2.80	-0.01	27.20
	A-3			0.00	0.00	30.00
	A-4			2.80	0.01	32.80
	A-5			5.60	0.02	35.60
	A-6			8.40	0.03	38.40
	A-7			11.20	0.04	41.20
	A-8			14.00	0.05	44.00

規則波と不規則波の打ち上げ高さ等の比較において、規則波の沖波波高は、不規則波の沖波有義波高に対応させた。

改良仮想勾配法で波の打ち上げ高さを求める場合には、砕波水深を求めなければならない。一般には、規則波の h_b (砕波水深) と換算沖波波高の関係図¹¹⁾より求めるが、実際の波は不規則波であるため、有義波高の最大値の出現水深の算定図¹²⁾でも砕波水深を求め、両者を用いて波の打ち上げ高さの比較を行った。

= $1.23h_b/H_0$ 規の關係が認められ、有義波高の算定図より求めた碎波水深が、規則波の算定図を用いて求めた碎波水深よりも 23%程度大きい値を示した。

Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between the normalized black hole mass h_b/H_0 (y-axis) and the normalized host galaxy mass h_b/H_0 (x-axis). The data points are red circles, and a solid black line represents the 1:1 relation. A dashed line indicates the 1.23 ratio. The text h_b/H_0 '有'=1.23 h_b/H_0 '規 is written above the dashed line.

以降の記述する改良仮想勾配法の打ち上げ高さは、現行どおり規則波を用いた碎波水深を用いている。

(2) 改良仮想勾配法と法先水深を考慮した豊島らの波の打ち上げ高算定図の比較

図-4 は、 $h_i/L_0=0.00\sim0.03, 0.05$ のケースで豊島らの算定図⁸⁾から求めた打ち上げ高さと換算沖波波高の比を縦軸に、改良仮想勾配法より求めた打ち上げ高さと換算沖波波高の比を横軸にプロットし、相対水深別に比較したものである。ただし豊島らの算定図において、相対水深が負になるケースと $h_i/L_0=0.04$ のケースは打ち上げ高算定図が得られていないので、算定結果より除外してある。図より、改良仮想勾配法の打ち上げ高さに対し、豊島らの算定図より求めた打ち上げ高さは $h_i/L_0=0.00$ のケースでは 0.6 程度になるが、その他のケースでは、1~3 倍弱の値になっており、 h_i/L_0 が 0.01 以上になると、豊島らの波の打ち上げ高さが 1.0 より大きくなっている。これらの結果は、改良仮想勾配法では法先水深が大きくなる $h_i/L_0=0.01$ 以上になると波の打ち上げ高さが過小評価となる。

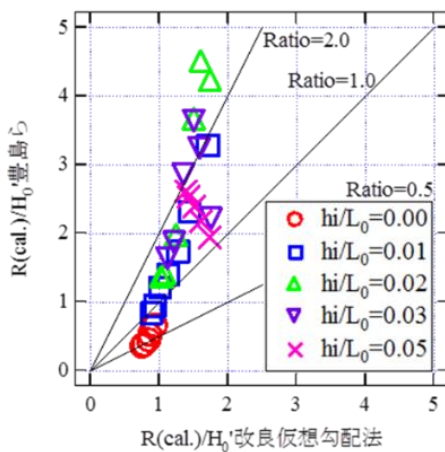


図-4 算定方法による R/H_0' 比較

(3) 改良仮想勾配法と本実験値の波の打ち上げ高さの比較¹³⁾

図-5 は、 $h_i/L_0=-0.02\sim0.05$ のケースで改良仮想勾配法より求めた打ち上げ高さと換算沖波波高比を横軸に、2%超過打ち上げ高さ $R_{2\%}/H_0'$ 、1/3 最大打ち上げ高さ $R_{1/3}/H_0'$ 及び平均打ち上げ高さ R_{mean}/H_0' をパラメータとして、実験値を縦軸にプロットしたものである。図より、各パラメータともばらつきがあるが、改良仮想勾配法の計算値に対するそれぞれの値は、 $R_{2\%}/H_0'$ で約 1.2~3 倍、 $R_{1/3}/H_0'$ で約 0.8~2.3 倍の値、 R_{mean}/H_0' で約 0.5~1.5 倍となっている。

図-6~8 は、図-5 を相対水深別に分けて比較を行ったものである。図-6~8 はそれぞれ

$h_i/L_0=-0.02\sim0.00$ の 3 ケース、 $h_i/L_0=0.01\sim0.03$ の 3 ケース及び $h_i/L_0=0.04\sim0.05$ の 2 ケースである。図-6 より、 $h_i/L_0=-0.02\sim0.00$ の範囲では、改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さは R_{mean}/H_0' より大きく、 $R_{1/3}/H_0'$ と同程度の値、 $R_{2\%}/H_0'$ が約 1.7 倍程度の値を示している。

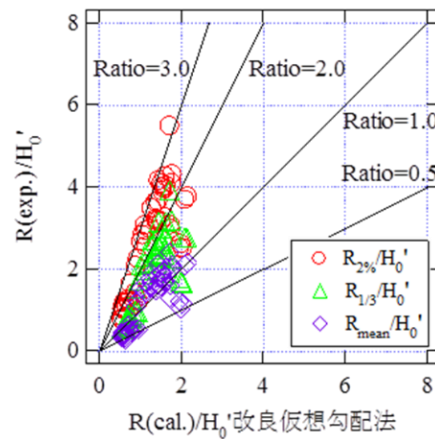


図-5 算定値と実験値の比較
($h_i/L_0=-0.02\sim0.05$)

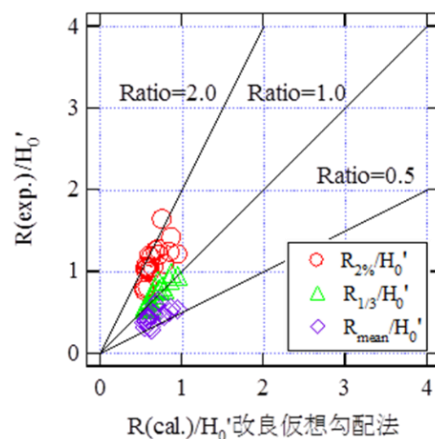


図-6 算定値と実験値の比較
($h_i/L_0=-0.02\sim0.00$)

図-7 の $h_i/L_0=0.01\sim0.03$ の範囲では、 R_{mean}/H_0' の値は改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さの約 1.0~1.5 倍程度の値、 $R_{1/3}/H_0'$ では改良仮想勾配法の打ち上げ高さの約 1.3~2.3 倍の値となっている。一方、図-8 の $h_i/L_0=0.04\sim0.05$ では、図-6, 7 と異なり右下がりの傾向が認められ、 R_{mean}/H_0' の値は改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さの約 0.5~1.2 倍の値となっており、 $R_{1/3}/H_0'$ では約 0.9~1.8 倍の値となっている。 $h_i/L_0=0.01\sim0.03$ に比べ過小評価の傾向が幾分改善されている。

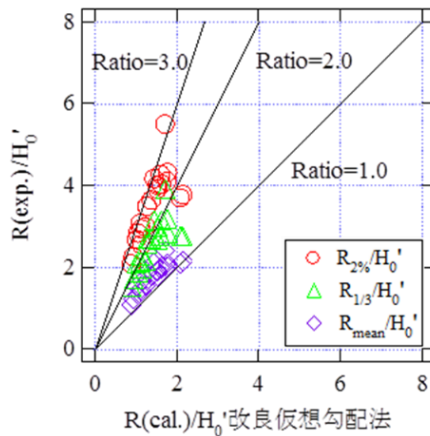


図-7 算定値と実験値の比較
($h_i/L_0=0.01\sim0.03$)

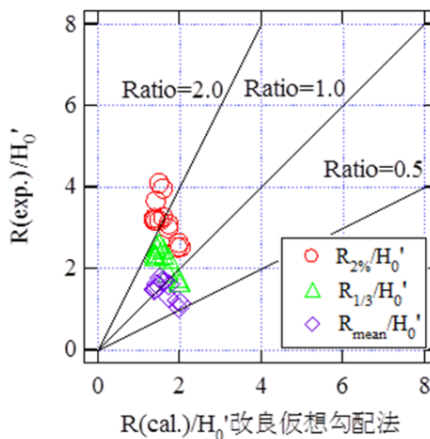


図-8 算定値と実験値の比較
($h_i/L_0=0.04\sim0.05$)

これらのことから、 $h_i/L_0=-0.02\sim0.00$ の範囲では、改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さ R/H_0' と不規則波の代表打ち上げ高さ $R_{1/3}/H_0'$ がほぼ対応するが、 $h_i/L_0=0.01\sim0.03$ の範囲では、改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さは過小評価となり、 $h_i/L_0=0.04\sim0.05$ でもケースによって改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さが過小評価となる傾向が認められた。

(4) 豊島らの算定図と本実験値の波の打ち上げ高さの比較

図-9 は、豊島らの算定図から求めた打ち上げ高さを横軸に、本実験結果を縦軸に代表打ち上げ高さをパラメータとして、図示したものである。豊島らは規則波、本実験は不規則波を使用しているので、規則波に対する不規則波の代表打ち上げ高さへの対応を検討したものである。図より、 $R_{2\%}/H_0'$ 、 $R_{1/3}/H_0'$ 及び

R_{mean}/H_0' の値は、それぞれ豊島らの算定値の約 0.9~2.4 倍、約 0.7~1.8 倍及び約 0.5~1.3 倍程度の値となっている。

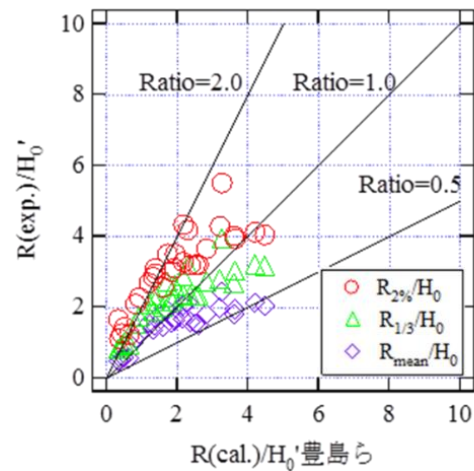


図-9 算定値と実験値の比較
($h_i/L_0=0.00\sim0.03, 0.05$)

(5) 代表打ち上げ高さの実験値と 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比較

Longuet-Higgins¹⁰⁾は、不規則波の波高分布が、Rayleigh 分布に従うとして N (波の波数) = 100 とした場合の代表波高 H_x (H_{mean} , $H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $H_{2\%}$, H_{max}) 間の関係式を示した (表-2)。加藤らは、波の代表打ち上げ高さ R_x (R_{mean} , $R_{1/3}$, $R_{1/10}$, $R_{2\%}$, R_{max}) 間においても上述の関係式にほぼ従うことを示唆している。また、不規則波による護岸への波の打ち上げ高さは Rayleigh 分布に従う報告^{14) 15) 16)}もされている。

表-2 Longuet-Higgins による代表波高間の関係
($N=100$)

	H_{mean}	$H_{1/3}$
H_{mean}	1.00	0.625
$H_{1/3}$	1.60	1.00
$H_{1/10}$	2.03	1.27
$H_{2\%}$	2.24	1.40
H_{max}	2.45	1.53

図-10, 11 は, $h_i/L_0=0.00\sim0.05$ のケースで, それぞれ $R_{1/10}$ と $R_{1/3}$ 及び $R_{1/3}$ と R_{mean} 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関係を示したものである. 両図より, 各代表打ち上げ高さ間の関係においても各代表波高間の関係とほぼ対応するものと思われる. そこで上記の手法を用いて, 代表打ち上げ高さを推定する. $R_{1/10}$ を例にとると, 表-2 の $H_{1/10}=2.03 H_{mean}$ と $H_{1/10}=1.27 H_{1/3}$ の関係式は, $R_{1/10}=2.03 R_{mean}$ と $R_{1/10}=1.27 R_{1/3}$ として求めることができる.

図-12(a), (b)は, 相対水深 $h_i/L_0=0.00\sim0.05$ の範囲で, $R_{1/10}/H_0'$ の代表打ち上げ高さの実験値を横軸に, 表-2 の関係式を用いた計算値を縦軸にプロットし比較したものである. 縦軸の計算値は, それぞれ $R_{1/3}$ 及び R_{mean} を基準として求めた値である. 図(b)の R_{mean} を基準とした計算値と実験値は, 誤差 25%を超える結果も現れている. $R_{1/3}$ を基準とした図(a)の計算値のほうが R_{mean} を基準とした場合よりばらつきが小さくなっていることが認められる.

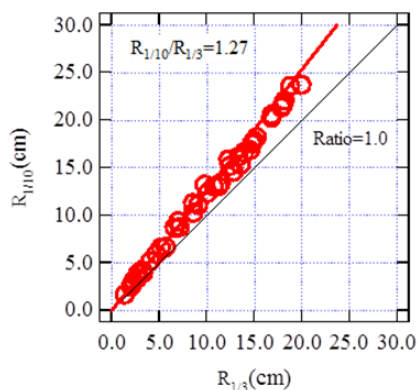


図-10 $R_{1/10}$ と $R_{1/3}$ の関係
($h_i/L_0=0.00\sim0.05$)

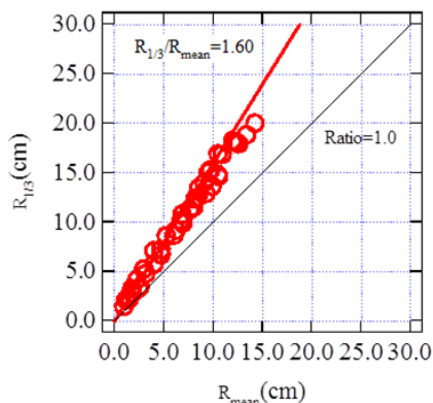


図-11 $R_{1/3}$ と R_{mean} の関係
($h_i/L_0=0.00\sim0.05$)

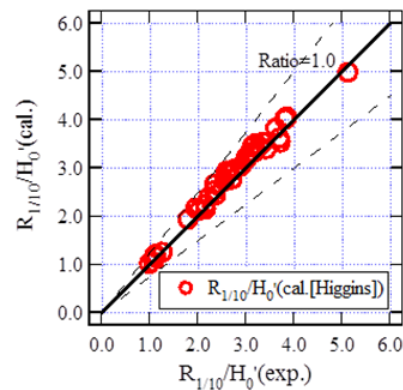


図-12(a) $R_{1/10}/H_0'$ の実験値と算定値の比較
($R_{1/3}$ を基準)

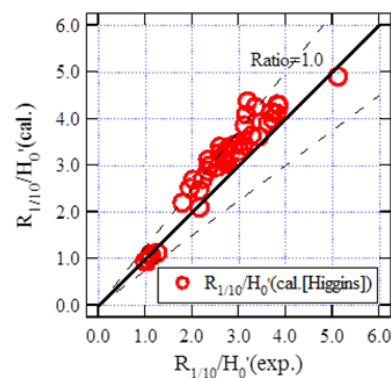


図-12(b) $R_{1/10}/H_0'$ の実験値と算定値の比較
(R_{mean} を基準)

図-13, 図-14 は, $h_i/L_0=0.00\sim0.05$ の範囲で, それぞれ R_{mean}/H_0' の代表打ち上げ高さを $R_{1/3}$ 及び $R_{1/3}/H_0'$ の代表打ち上げ高さを R_{mean} を基準として計算した値と実験値を比較したものである. 代表打ち上げ高さが $R_{2\%}/H_0'$ や $R_{1/10}/H_0'$ に比べて小さい値のためか, 両図とも誤差が 25%以内であり, 比較的良好に対応していると思われる.

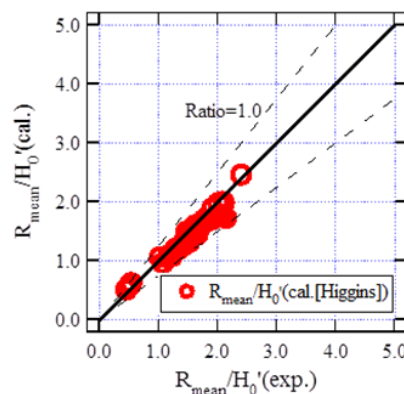


図-13 R_{mean}/H_0' の実験値と算定値の比較
($R_{1/3}$ を基準)

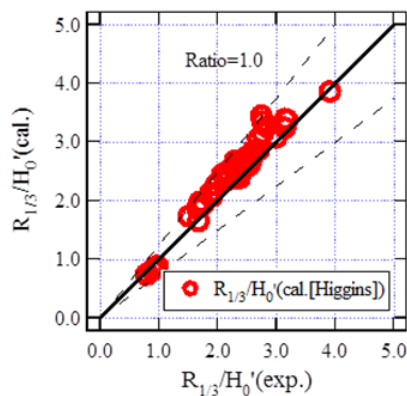


図-14 $R_{1/3}/H_0'$ の実験値と算定値の比較
(R_{mean} を基準)

これらのことから、各代表打ち上げ高さとも $R_{1/3}$ を基準として計算した方が、 R_{mean} を基準とした値よりもばらつきは小さく、実験値と計算値はほぼ対応する。

4. おわりに

本研究は、傾斜護岸の中で比較的多く築造されている $1/3$ 勾配を対象とし、設計指針として用いられている改良仮想勾配法と豊島らの算定図による波の打ち上げ高さの関係や特性を法先水深に着目して検討するとともに、不規則波の代表打ち上げ高さとの関係を明らかにした。また、相対水深 $h_i/L_0=0.00\sim0.05$ の範囲で、不規則波の各代表打ち上げ高さ間を推定する方法についても検討を行った。限られた検討条件ではあるが、主な結果は以下のとおりである。

- (1) 有義波高の算定図より求めた碎波水深が、規則波の算定図を用いて求めた碎波水深よりも23%程度大きい値を示し、両水深を用いた改良仮想勾配法による波の打ち上げ高さは同程度となった。
- (2) 豊島らの算定図による波の打ち上げ高さと改良仮想勾配法による波の打ち上げ高さとの関係を求めた結果、堤脚水深が大きくなる場合改良仮想勾配法は過小評価となる。
- (3) 改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さは $h_i/L_0=-0.02\sim0.00$ の範囲において、不規則波の代表打ち上げ高さ $R_{1/3}/H_0'$ とほぼ対応するが、 $h_i/L_0=0.01\sim0.03$, $0.04\sim0.05$ の範囲では、改良仮想勾配法で求めた打ち上げ高さは過小評価となる傾向が認められた。
- (4) 代表打ち上げ高さの実験値と Longuet-Higgins による不規則波の代表波高間の関係式を用いた計算値の比較から、各代表打ち上

げ高さとも $R_{1/3}$ を基準として計算した方が、 R_{mean} を基準とした値よりもばらつきは小さく、実験値と計算値はほぼ対応する。

参考文献

- 1) 豊島修, 首藤伸夫, 橋本宏: 海岸堤防への波の打ち上げ高-1/30-, 第11 海岸工学講演会概要集, pp.260-265, 1964.
- 2) 豊島修: 傾斜護岸工法, 第34 海岸工学講演会論文集, pp.447-451, 1987.
- 3) 高田彰: 規則波の打ち上げ高及び越波量の定量化について, 第22 回海岸工学講演会概要集, pp.377-386, 1975.
- 4) 間瀬肇, Hedges, T. S., Shareef, M., 永橋俊二: 波の打ち上げを考慮した緩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, 2003.
- 5) 間瀬肇, 宮平彰, 桜井秀忠, 井上雅夫: 汀線近傍の護岸への不規則波の打ち上げに関する研究-算定打ち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, 2003.
- 6) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏: 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 56, No.2, pp.936-940, 2009.
- 7) 中村充, 佐々木泰雄, 山田譲二: 複合断面における波の打ち上げに関する研究, 第19 回海岸工学講演会講演集, pp.309-312, 1972.
- 8) 例えば 豊島修, 首藤伸夫, 橋本宏: 海岸堤防への波の打ち上げ高-1/20-, 第12 海岸工学講演会概要集, pp.180-185, 1965.
- 9) 加藤悠司, 高橋敏彦, 新井信一: 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, 海岸工学論文集, 第53 巻, pp.721-725, 2006.
- 10) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. XI, No. 3, pp.245-266, 1952.
- 11) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180 号, pp.39-49, 1970.
- 12) 合田良実: 浅海域における碎波変形, 港湾技術研究報告, 第14 巻, 第3 号, pp.59-106, 1975.
- 13) 斎藤裕平, 高橋敏彦: 不規則波による傾斜護岸への代表打ち上げ高さに関する検討, 第69 回年次学術講演概要集, II-021, 2014.
- 14) 例えば 参考文献5)
- 15) 例えば 山城賢, 吉田明徳, 久留島暢之, 井ノ口洋平, 入江功: 大水深域における非越波型護岸の開発, 海岸工学論文集, 第50 巻, pp.641-645, 2003.
- 16) 斎藤裕平, 高橋敏彦, 小林且幸, 新井信一: 傾斜護岸への法先水深を考慮した波の打ち上げ高さに関する一検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I_841-I_846, 2015.