

# 人工リーフ背後の緩傾斜護岸における打ち上げ高・越波量について

## On Wave Runup Height and Overtopping Quantity of Gentle Slope Revetment Placed behind Artificial Reef

太田隆夫<sup>1</sup>・木村 晃<sup>2</sup>・松見吉晴<sup>2</sup>

Takao OTA, Akira KIMURA and Yoshiharu MATSUMI

Laboratory experiments were conducted in a wave flume to investigate the runup height and volume of overtopped water changed the water depth at the toe and the crest height of a gentle slope revetment. A time-averaged numerical wave model and a semi-empirical runup and overtopping model were applied to the computation of the runup height and overtopping rate. The results of the experiments showed that the long-period wave measured behind the artificial reef influenced wave runup and overtopping. The runup and overtopping model was modified to take into account the influence of the long-period wave. The numerical model predicted the overtopping rate reasonably well in the case of low crest height of the revetment and relatively large overtopping rate.

### 1. はじめに

わが国では、最近の20年程度の間、波の打ち上げ高・越波量低減および海浜の侵食防止を目的として、多数の人工リーフが施工されてきた。一方で、海浜や護岸等における打ち上げ高や越波量は、これらの構造物の設計で重要な検討項目であり、その算定については多くの研究が行われてきた。その成果として、打ち上げ高では、斜面上の規則波・不規則波に対する算定図・算定式（たとえば、豊島ら, 1964; Mase, 1989）、越波量では各種護岸に対する算定図・算定式（たとえば、合田ら, 1975; 合田, 2008）が提案されている。また、最近では、各種の数値波動モデル（時間発展型）による算定が行われ、その有用性が確認されてきている（たとえば、(財)沿岸技術研究センター, 2008）。しかし、従来の算定図・算定式は、任意の（複雑な）海底地形や、海岸構造物が複合的に配置された場合への適用が難しく、数値波動モデルでは計算時間や利用の容易さの点で課題が残されている。本研究は、海岸構造物の複合的配置の一例として、

人工リーフ背後の汀線近傍に緩傾斜護岸が設置された場合を対象に、護岸における打ち上げ高および越波量の特長について模型実験により検討するとともに、数値モデル（時間平均型）による打ち上げ高・越波流量の算定を試みたものである。

### 2. 模型実験

不規則波造波水槽（長さ29m、幅0.5m、高さ0.75m）に1/30勾配の斜面を置き、その上に碎石を用いた人工リーフ模型と、背後の汀線近傍に1/3勾配の緩傾斜護岸模型（塩ビ板）を設置した。実験装置の概要を図-1に示す。人工リーフ模型は、天端幅110cm、沖側のり面勾配1:3、岸側のり面勾配1:2、堤脚水深22.2cm、天端水深5.5cmとした。使用した碎石は、密度2.58g/cm<sup>3</sup>、代表粒径 ( $D_{n50}$ ) 2.52cmで、空隙率は約0.4である。また、波の作用で碎石が移動しないように、模型の表面を金網で覆った。緩傾斜護岸については、表-1に示したのり先水深・天端高となるように塩ビ板の長さを変えて設置した。

不規則波の期待スペクトルとして、JONSWAPスペク

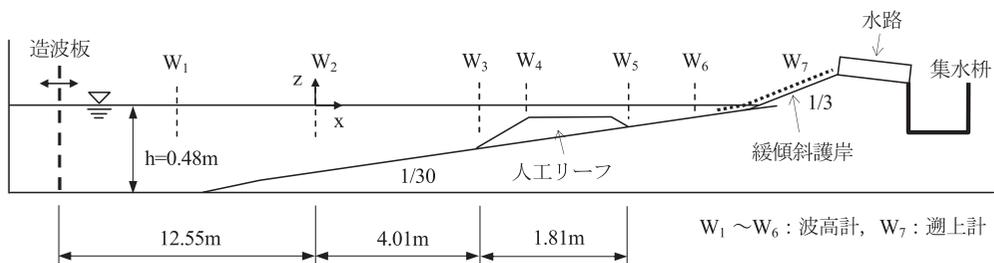


図-1 実験装置

- 1 正会員 博(工) 鳥取大学助教大学院工学研究科  
社会基盤工学専攻
- 2 正会員 工博 鳥取大学教授大学院工学研究科  
社会基盤工学専攻

表-1 実験条件

|             |            |                     |
|-------------|------------|---------------------|
| 有義波高        | $H_0$ (cm) | 8.6                 |
| ピーク周期       | $T_p$ (s)  | 1.2, 1.8            |
| 沖波波形勾配      | $H_0/L_0$  | 0.038, 0.017        |
| 護岸のり先水深     | $h_t$ (cm) | 0, 1.55, 3.01, 6.11 |
| 護岸天端高       | $h_c$ (cm) | 6.45, 8.6, 10.75    |
| 護岸のり先水深・波高比 | $h_t/H_0$  | 0, 0.18, 0.35, 0.71 |
| 護岸相対天端高     | $h_c/H_0$  | 0.75, 1.0, 1.25     |

表-2 波高計の設置位置

|        |       |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | $W_1$ | $W_2$ | $W_3$ | $W_4$ | $W_5$ | $W_6$ |
| 距離 (m) | 7.6   | 12.55 | 16.56 | 17.06 | 18.37 | 20.37 |

トル（集中度パラメータ  $\gamma_c=3.3$ ）を用い、サンプリング間隔0.05s, データ数12000として10分間の信号を作成した。入射波の諸元、護岸のり先水深・波高比および護岸相対天端高を表-1に合わせて示す。ただし、沖波波長は  $L_0=156T_p^2$  で与えた。  $H_0/L_0, h_t/H_0$  および  $h_c/H_0$  の設定値は、  $H_0/L_0=0.038$  を除いて玉田ら（2001, 2002）の実験にならった。

波高計（6本）と、護岸のり面上（一部1/30斜面上）に遡上計を設置し、造波開始から30秒後に水位計測をスタートさせて、550秒間のデータを記録した。また、遡上計の護岸のり面からの高さ  $\delta_r$  は5mmである。表-2に波高計の設置位置を造波板からの水平距離で示す。護岸模様の背後に、越波量を計測するための集水枡を置き、護岸天端との間を水路（幅37cm）で接続した。実験時には、造波開始から10分間に生じた越波の回数を、目視によりカウントした。越波した水の総体積を、造波時間（600秒）と水路幅で除して、越波流量  $q_o$  を求めた。遡上計での測定値については、鉛直方向の水位（打ち上げ波の水位）  $\eta_r$  に換算してその平均値  $\bar{\eta}_r$  を計算し、  $\eta'_r=(\eta_r - \bar{\eta}_r)$  をゼロクロス法で解析することにより、1波ごとの打ち上げ高  $R$  を求めた。

### 3. 数値モデル

本研究で用いた数値モデルは、Kobayashi・de los Santos（2007）による、時間平均型波浪変形モデルと打ち上げ高・越波流量算定のための確率モデルを組み合わせたものである。波浪変形モデルは、時間平均された連続式、運動量方程式およびエネルギー方程式からなり、計算結果として水位および透過性堤体内外の水平流速の平均値・標準偏差、エネルギーフラックス、エネルギー逸散率などが得られる。波浪変形モデルの詳細については、Kobayashi・de los Santos（2007）、太田ら（2007）を参照されたい。また、この数値モデルでは、図-1に示したように、波高計  $W_2$  の位置を原点に岸向きを正とした  $x$  座標と、静水面から上向きを正とした  $z$  座標を用いる。

打ち上げ高・越波流量算定モデルでは、波浪変形モデルで得られた水位変動の平均値（wave setup）  $\bar{\eta}$  と標準偏差  $\sigma_\eta$  から、打ち上げ波の水位の平均値  $\bar{\eta}_r$  と標準偏差  $\sigma_r$  を求める。図-2に示すように、  $(\bar{\eta} + \sigma_\eta)$ 、  $\bar{\eta}$ 、  $(\bar{\eta} - \sigma_\eta)$  と遡上計との交点  $Z_1, Z_2, Z_3$  は、  $\bar{\eta}$ 、  $\sigma_\eta$  と遡上計の位置  $(z_b + \delta_r)$  によって得られる。ここに、  $z_b$  : 護岸のり面の  $z$  座標である。  $Z_1 \approx \bar{\eta}_r + \sigma_r$ 、  $Z_2 \approx \bar{\eta}_r$ 、  $Z_3 \approx \bar{\eta}_r - \sigma_r$  と仮定すると、  $\bar{\eta}_r$ 、  $\sigma_r$  は次式で与えられる。

$$\bar{\eta}_r = (Z_1 + Z_2 + Z_3) / 3 ; \sigma_r = (Z_1 - Z_3) / 2 \dots\dots (1)$$

1/3最大打ち上げ高  $R'_{1/3}$  は  $\sigma_r$  を用いて

$$R'_{1/3} = (2 + \tan \theta) \sigma_r \dots\dots\dots (2)$$

で求められる。ここに、  $\theta$  : 護岸のり面の水平からの角度であり、したがって  $\tan \theta = 1/3$  である。さらに、  $q_o$  をつぎのような経験式で求める。

$$q_o / q_{SWL} = A(P_o)^B \dots\dots\dots (3)$$

ここに、  $q_{SWL}$  : 汀線位置  $x=x_{SWL}$  での波による岸向きの流束 (=  $\sigma_\eta \cdot \sigma_u$ 、  $\sigma_u$  : 水平流速の標準偏差)、  $A, B$  : 経験的なパラメータである。  $\sigma_u$  は、上述のように波浪変形モデルで

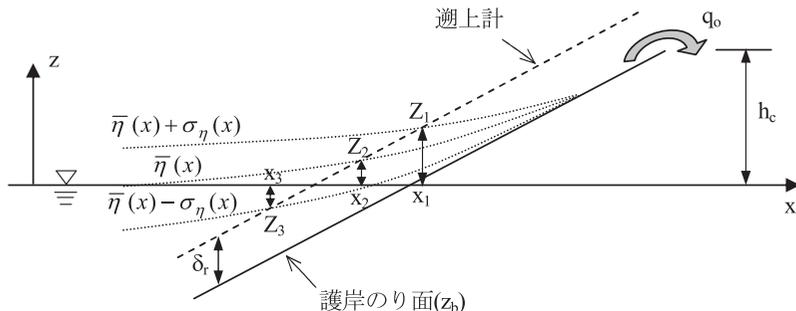


図-2 打ち上げ高・越波流量算定のための説明図

計算されたものである。P<sub>o</sub>は越波を生じる確率で、打ち上げ高R'の確率分布がWeibull分布で表せると仮定して、

$$P_o = \exp(-2h_*^\kappa) ; h_* = (h_c - \bar{\eta}_r) / R'_{1/3} \quad \dots\dots(4)$$

と与える。ここに、h<sub>c</sub>：護岸の天端高である。κは形状母数であり、つぎのような経験式で与えている。

$$\kappa = 2 + 0.5h_*^{-3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

本論文では式を記載していないが、波浪変形モデルで水平流速の平均値を与える式にq<sub>o</sub>が含まれるため、q<sub>o</sub>=0を初期値として誤差が0.5%以下になるまで繰り返し計算を行う。

4. 実験および計算結果

(1) 実験結果

図-3は、2%超過打ち上げ高R'<sub>2%</sub>、1/10最大打ち上げ高R'<sub>1/10</sub>とR'<sub>1/3</sub>との比を、図-4はR'<sub>2%</sub>とR'<sub>1/10</sub>との比を示したものである。図中の直線は、打ち上げ高の確率分布をRayleigh分布と仮定した場合の代表打ち上げ高比を表している。また、●、▲は、図-3においてRayleigh分布による関係と異なる（大きく下回る）ものを示しており、結果的には本研究で行った実験のうち、q<sub>o</sub>の値の上位7ケース（q<sub>o</sub>>0.46 cm<sup>2</sup>/s）となっている。それらの実験条件とq<sub>o</sub>の値を表-3に示すが、q<sub>o</sub>>0.46 cm<sup>2</sup>/sの物理的意味は明確でない。R'<sub>2%</sub>とR'<sub>1/10</sub>との比では、q<sub>o</sub>の大小に関係

なく、実験値と直線はよく一致している。

図-5はR' / R'<sub>1/3</sub>の超過確率であり、×で示したq<sub>o</sub>が大きい場合には、打ち上げ高が護岸の天端高で頭打ちになる割合が増え、超過確率がRayleigh分布に比べて急に減少するような分布となる。それ以外の場合では、R' / R'<sub>1/3</sub>が0.7程度より小さい値の出現頻度が大きくなっている影響で、全体的にRayleigh分布の適合性はあまり高くないように見受けられる。しかし、図-3に示したように、代表打ち上げ高比では、間瀬ら（2003）の実験結果と同様に、Rayleigh分布とよく対応している。

図-6に、q<sub>o</sub>を(2gH<sub>0</sub>)<sup>0.5</sup>で無次元化したものを、h<sub>r</sub>/H<sub>0</sub>ごとに示した。h<sub>r</sub>/H<sub>0</sub>の減少やh<sub>r</sub>/H<sub>0</sub>の増加につれて、越波流量は減少しているが、合田ら（1975）による直立および消波護岸に対する算定図や、玉田ら（2001, 2002）が提案している緩傾斜護岸での算定図に比べ、h<sub>r</sub>の減少にともなうq<sub>o</sub>の変化（減少）が小さくなる傾向を示している。

図-7は、一様水深部の波高計W<sub>1</sub>、人工リーフ背後の波高計W<sub>6</sub>および遡上計W<sub>7</sub>における、T<sub>p</sub>=1.8sでの水位変動を示したものである。W<sub>6</sub>の図中の点線は、周波数0.1Hz以下の成分の波形η<sub>i</sub>である。特にT<sub>p</sub>=1.8sのデータでは、人工リーフ背後で入射波に比べて長い周期の変動が見られ、この変動による水位上昇と個々波の振幅増大が同時に起きる傾向が見られる。W<sub>7</sub>のデータでも同様で、打ち上げ高および越波に影響を及ぼしていると考えられる。

4. (2) に述べるように、本研究ではこの長周期変動の影響を数値モデルに取り込むことを試みる。

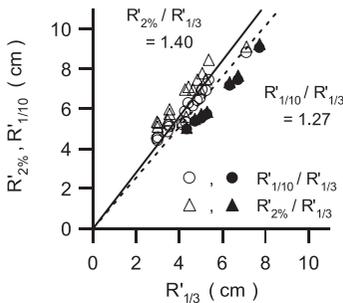


図-3 R'<sub>2%</sub>, R'<sub>1/10</sub>とR'<sub>1/3</sub>との関係

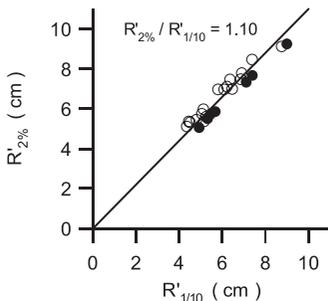


図-4 R'<sub>2%</sub>とR'<sub>1/10</sub>との関係

表-3 越波流量が大きいケース

| h <sub>r</sub> (cm) | h <sub>c</sub> (cm) | T <sub>p</sub> (s) | q <sub>o</sub> (cm <sup>2</sup> /s) |
|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1.55                | 6.45                | 1.8                | 0.60                                |
| 3.01                | 6.45                | 1.8                | 1.32                                |
|                     | 8.6                 | 1.8                | 0.55                                |
| 6.11                | 6.45                | 1.2                | 0.46                                |
|                     |                     | 1.8                | 2.30                                |
|                     | 8.6                 | 1.8                | 1.23                                |
|                     | 10.75               | 1.8                | 0.59                                |

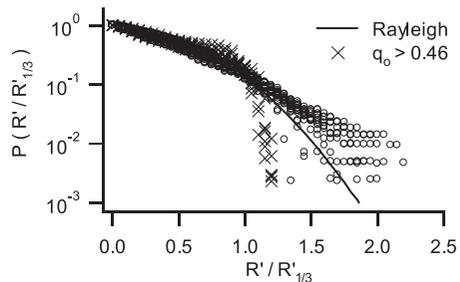


図-5 打ち上げ高の超過確率

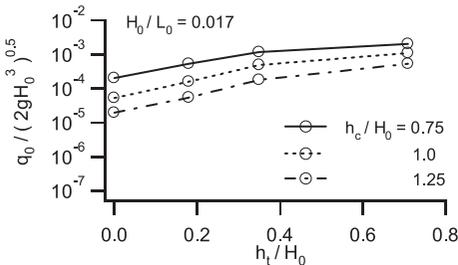
(2) 計算結果

3.に示した数値モデルを用いて、波浪変形計算ならびに1/3最大打ち上げ高、越波流量の算定を行う。波浪変形計算においては、図-1に示した $x=0$ から緩傾斜護岸天端までの底面形状、透過性堤体である人工リーフの層厚、 $x=0$  (波高計 $W_2$ )での平均水位 $\bar{\eta}$ 、rms波高 $H_{rms} = \sqrt{8} \sigma_{\eta}$ および $T_p$ を入力とし、 $\delta_r$ の値を実験と同じ5mm、 $x$ 方向の計算点間隔 $\Delta x$ を約1cmとした。結果を図に示していないが、 $\bar{\eta}$ と $\sigma_r$ の実験値と計算値はよく一致した。

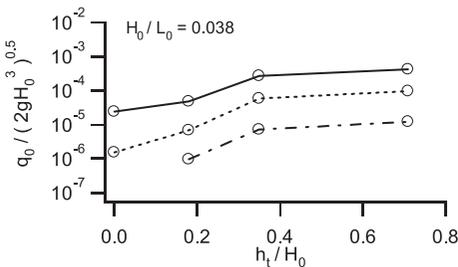
つぎに、 $q_o$ の計算値を得るために、式(3)に含まれるパラメータ $A, B$ の値を決める必要がある。このため、波浪変形モデルにより求めた $q_{SWL}$ と、 $q_o$ および $P_o$ の実験値を用いる。 $P_o$ の実験値は、計測した越波回数を造波信号における波数(327波;  $T_p=1.2s$ , 529波;  $T_p=1.8s$ )で除した値とする。図-8は、 $q_o/q_{SWL}$ と $P_o$ との関係を示したもので、最小二乗法による回帰直線と回帰式も合わせて記した。この結果より、 $A=0.402, B=1.0$ と決定した。

4. (1)に述べたように、長周期の水位変動が護岸における打ち上げ高と越波量に影響していると考えられる。本研究では、合田(1975)によるサーフビートの振幅に関する経験式を用いて、この影響を数値モデルに反映させるを試みた。合田はサーフビート波形の標準偏差 $\sigma_{\zeta}$ を次式で与えている。

$$\sigma_{\zeta} = \frac{0.01 H'_0}{\sqrt{(H'_0/L'_0)(1+d/H'_0)}} \dots\dots\dots(6)$$



(a)  $T_p=1.8s$



(b)  $T_p=1.2s$

図-6 越波流量の変化

ここに、 $H'_0$ :換算沖波有義波高、 $d$ :水深、 $L'_0$ :沖波有義波長である。式(6)で求められる $\sigma_{\zeta}$ の値を用いて、サーフビートの1/3最大振幅 $\sigma_{\zeta 1/3}$ を $2\sigma_{\zeta}$ で与え、式(1)で得られる $\bar{\eta}_r$ と $\sigma_r$ に次式のように加えることとした。

$$\bar{\eta}'_r = \bar{\eta}_r + a_{\zeta 1/3}; \sigma'_r = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{\zeta}^2} \dots\dots\dots(7)$$

$\sigma_{\zeta}$ の計算においては、 $H'_0$ を波高計 $W_1$ での有義波高とし、 $L'_0$ を $156T_p^2$ で与え、 $d=0$ とした。式(7)で与えられる $\bar{\eta}'_r$ 、 $\sigma'_r$ を $\bar{\eta}_r$ 、 $\sigma_r$ の代わりに用いて、式(2)から(5)により $R'_{1/3}$ と $q_o$ を求めた。図-9, 10に、静水面を基準とした1/3最大打ち上げ高 $R'_{1/3}$ と $q_o$ の実験値と計算値との比較を示す。ただし、 $R'_{1/3}$ の実験値は $R'_{1/3}$ と $\bar{\eta}_r$ の実験値の和として、計算値は式(2)にもとづき、 $[(2 + \tan\theta)\sigma'_r + \bar{\eta}'_r]$ として求めたものである。1/3最大打ち上げ高では、計算値と実験値との比が(0.64, 0.97)の範囲にあり、計算値が過小となった。越波流量では、 $h_c$ が低く( $h_c=6.45, 8.6cm$ )、

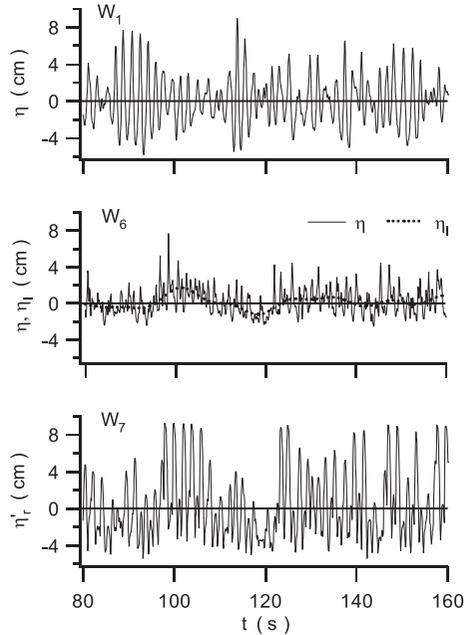


図-7 波高計 $W_1, W_6$ および遡上計での水位変動 ( $T_p=1.8s, h_r=6.11cm, h_c=10.75cm$ )

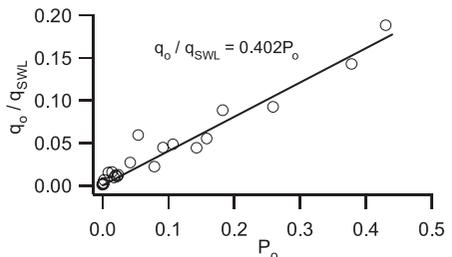


図-8  $q_o / q_{SWL}$ と $P_o$ との関係

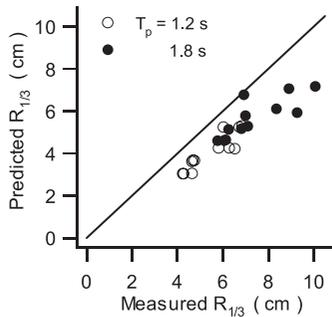


図-9 1/3最大打ち上げ高の比較

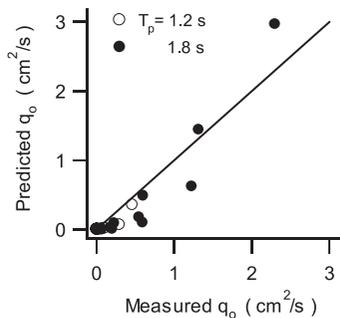


図-10 越波流量の比較

$q_o$ の(実験)値が比較的大きい( $q_o > 0.46 \text{ cm}^2/\text{s}$ )ケースで、計算値と実験値との比が(0.5, 1.3)の範囲にあるという結果が得られた。

## 5. おわりに

本研究では、人工リーフ背後の汀線近傍に設置された緩傾斜護岸における、打ち上げ高と越波量の特性について、模型実験により検討するとともに、時間平均型数値モデルを用いて1/3最大打ち上げ高と越波流量の算定を試みた。打ち上げ高の実験結果においては、代表打ち上げ高比と超過確率で、越波量が多い場合にRayleigh分布と異なる結果が得られた。越波流量では、これまでに提案されている、各種護岸における算定図に比べて、護岸のり先水深の違いによる越波流量の変化が小さい傾向を

示した。また、人工リーフ背後の波高計と護岸上の測上計で、特に $T_p=1.8\text{s}$ の場合に長周期の水位変動が見られた。この現象が打ち上げ高および越波に影響を及ぼしていると考え、サーフビートの振幅に関する経験式を用いて数値モデルに反映させ、1/3最大打ち上げ高と越波流量の算定を行った。打ち上げ高の計算値は実験値に比べて過小であり、越波流量では、天端高が低く越波流量が大きい場合に、妥当な計算結果が得られた。今後はさらに、人工リーフ設置条件および緩傾斜護岸勾配の影響などについて、模型実験および数値計算により検討する予定である。

## 参考文献

- (財)沿岸技術研究センター(2008): CADMAS-SURF実務計算事例集, 沿岸技術ライブラリー No.30, 306p.
- 太田隆夫・松見吉晴・木村 晃(2007): 断面変形を伴う傾斜堤の越波量からみた性能評価, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 746-750.
- 合田良実(1975): 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 第3号, pp.59-106.
- 合田良実(2008): CLASHデータベースに基づく統一的越波流量推定式の提案, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 939-944.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊(1975): 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. 3-44.
- 玉田 崇・井上裕規・井上雅夫(2001): 緩傾斜護岸における越波流量算定図の提案と時間的変動特性に関する考察, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 311-316.
- 玉田 崇・井上雅夫・手塚崇雄(2002): 緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 641-645.
- 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏(1964): 海岸堤防への波のうちあげ高-海底勾配1/30-, 第11回海岸工学講演会講演集, pp.260-265.
- 間瀬 肇・宮平 彰・桜井秀忠・井上雅夫(2003): 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上げ高の関係-, 土木学会論文集, No. 726/II-62, pp. 99-107.
- Kobayashi, N and F.J. de los Santos (2007): Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. 133(4), pp. 245-254.
- Mase, H. (1989): Random wave runup on gentle slope, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. Vol. 118, No. 5, pp. 649-661.