

# 人工リーフ-傾斜護岸による不規則波の打ち上げ特性 ～竹浦海岸水理模型実験～

Characteristics of Wave Run-Up of Irregular Waves on Slope-Type Seawalls and Artificial Reefs

(株)アルファ水工コンサルタンツ	○正会員	佐野 朝昭 (Tomoaki Sano)
同	正会員	吉野 真史 (Masafumi Yoshino)
同	名誉会員	近藤 俣郎 (Hideo Kondo)
北海道胆振支庁室蘭土木現業所		田中 則男 (Norio Tanaka)
同		佐藤 隆啓 (Takahiro Sato)

## 1. まえがき

近年、我が国の砂浜海岸の侵食が激しくなってきたことから、対応する保全工法も侵食対策と波浪高潮対策のいずれかというよりも、両者の機能をもつ複合工法の事例が増加している。それらは沖側の侵食工法として離岸堤や人工リーフ、岸側には緩傾斜護岸が採用される。透過性構造の離岸堤や緩傾斜護岸による波の反射、伝達、打ち上げならびに越波量の特長については既往の研究でかなり良く知られている。しかしながら複合工法については、構造物間の遊水部の存在により、現象が複雑で正確な解析的な解明は困難であり、水理模型実験による解明が望まれる課題である。この種の構造物の水理模型で留意すべき事項としては、現地不規則波の再現性、不規則データの処理法、ならびに縮尺効果がある。本論文では、竹浦海岸についての水理模型実験に関連して、それらの課題について検討し、実験した知見を発表する。

## 2. 実験の目的

竹浦海岸は、北海道白老郡白老町字竹浦に位置する太平洋に面した海岸である(図-1)。当海岸では高波浪時における背後地への越波、浸水被害の対策として、人工リーフと緩傾斜護岸による海岸保全施設整備が進められており、既に16基の人工リーフが整備されている。しかしながら、人工リーフ群が所定の効果を必ずしも発揮せず、背後地への浸水(写真-1)および人工リーフ群端部での侵食が深刻な

状況となっている。平成15年度には、人工リーフ群周辺の波浪・流況調査を実施し、越波(浸水)に対しては人工リーフの嵩上げ若しくは拡幅、侵食に対しては離岸堤の整備を対策として提案された。

平成16年5月21日に来襲したうねり性波浪( $H_{1/3}=2.13\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.4\text{sec}$ 、 $H_{\text{max}}=3.28\text{m}$ 、 $T_{\text{max}}=10.3\text{sec}$ )によって背後地への浸水が生じたが、その状況は上記調査結果より新たに提案した波浪低減率の図表(風波のみを対象)においても再現できなかった。すなわち、竹浦海岸における対策工の検討においては、人工リーフの波浪低減効果のみならず、打ち上げ高に至るまで調査を行う必要があると考えられる。しかし、波浪の打ち上げの現地観測は非常に困難であるため、水理模型実験によって最適な対策案を立案することを目的とした。



写真-1 越波状況(2003.01.28撮影)

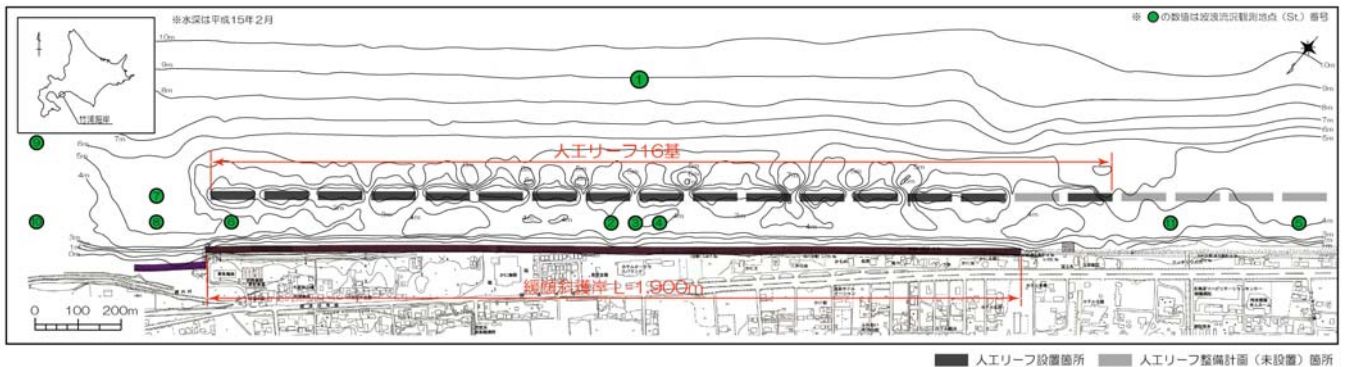


図-1 竹浦海岸施設平面図および平成15年度現地調査位置図

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験水槽

水理模型実験は、北海道水産林務部漁港実験室の二次元造波水路(長さ30.0×幅1.0×高さ1.2m)において実施した。造波装置には、反射波吸収制御可能なものを使用し不規則波を発生させ、容量式波高計6台により、人工リーフの前後・背後遊水部・傾斜護岸前面および法面での波高を計測した(図-2)。

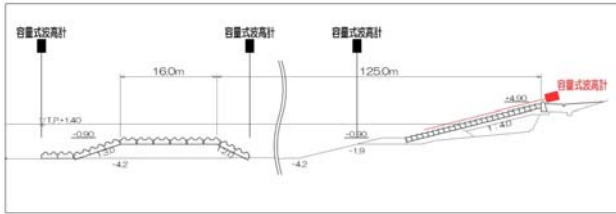


図-2 模型断面図(現地スケール)

#### 3.2 実験波の設定

実験波は、当該海岸の重要度を勘案して30年確率波とし、同海岸の全体計画<sup>1)</sup>に沿った値( $H_{1/3}=6.8\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.5\text{sec}$ )とする。また、潮位は危険側を想定してH.H.W.L.=T.P.+1.4mとした。

造波波浪は不規則波とするため、目標スペクトル形については平成15年度調査結果をもとに決定した。図-3に平成15年度調査における波浪の周波数スペクトル解析結果および同調査における有義波より算定したブロードシュナイダー・光易型スペクトルならびにJONSWAP型スペクトルを示す。また、JONSWAP型スペクトルの浅海域での変形を考慮したTMAスペクトルについても併記する。これより、竹浦海岸での波浪観測結果とJONSWAP型スペクトルがほぼ相似関係にあるため、これを実験スペクトルとして造波信号を作成した(図-4)。JONSWAP型スペクトルは下式のように表される。

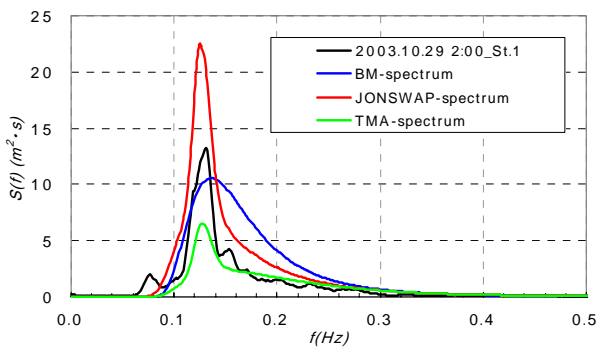


図-3 周波数スペクトルの比較

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \times \gamma \exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2] \quad (1)$$

ここに、

$$\beta_j \doteq \frac{0.0624[1.094 - 0.01915 \ln \gamma]}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$$

$$T_p \doteq T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}]$$

$$\sigma \doteq \begin{cases} 0.07 : f \leq f_p \\ 0.09 : f \geq f_p \end{cases}$$

$$\gamma = 1 \sim 7 (\text{平均} 3.3)$$

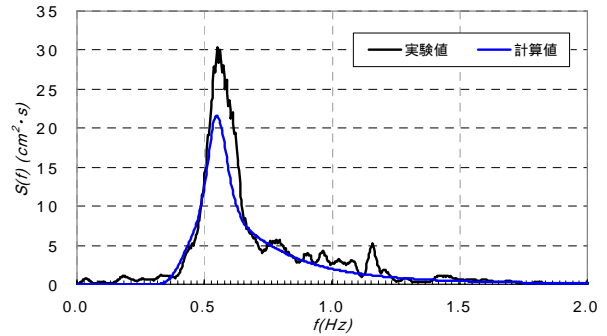


図-4 実験結果と計算値(JONSWAP)

#### 3.3 模型の設定および打ち上げ高の評価手法

模型はFroudeの相似則に従うものとし、長さの縮尺を、造波可能最大波高および $H_{\text{max}}$ より1/46とし、被覆ブロックについても1/46模型を製作し現地状況を再現し、海底地形は、最も越波の頻度が多いとされる地点を、深淺測量および漁場図を用いて作成した。

本実験の目的は波の打ち上げの抑制であるため、実験の実施にあたっては、波の打ち上げ高を観測し、それが護岸天端高(T.P.+4.9m)を超過しない断面を有効な施設として採用する必要がある。そのために、容量式波高計を緩傾斜護岸に沿わせて計測を行った(写真-2)。

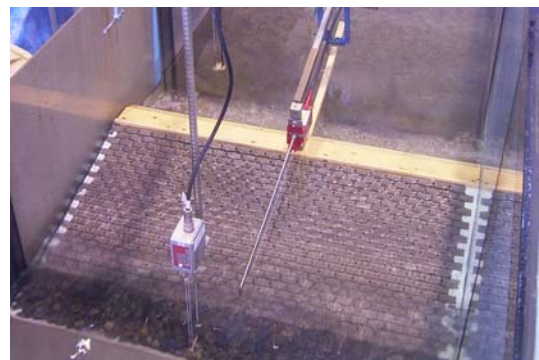


写真-2 打ち上げ高計測状況

現実に、護岸天端高を超える波の遡上を皆無とするには、施設が大規模になるものと考えられる。図-5に、あるCASEにおける緩傾斜護岸上の波高計による経時変化を示す。これによると、151波中24波が護岸天端高を越えて遡上している。ここで、一般に不規則波群を有義波で代表させて波浪特性を論じることに着目し、傾斜護岸における有義打ち上げ高 $R_{1/3}$ で越波を検討することとし、有義波高を超える成分波浪については、水引きおよび排水溝で背後への浸水を防ぐことと考えた。

一般的に振幅は平均水位を基準として波高の1/2になるが、図-5に示すように遡上高さのピークは平均水位より非常に大きくなり、平均水位より上方のピーク高さ(p1)と下方のピーク高さ(p2)は一致しないため、本実験における緩傾斜護岸での遡上高Rを次式のように定義する。

$$R = H.H.W.L. + \eta + R_{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $R_{1/3} = \{p1/(p1 + p2)\} \cdot H_{1/3}$ :有義打ち上げ高

$\eta$ :水位上昇量

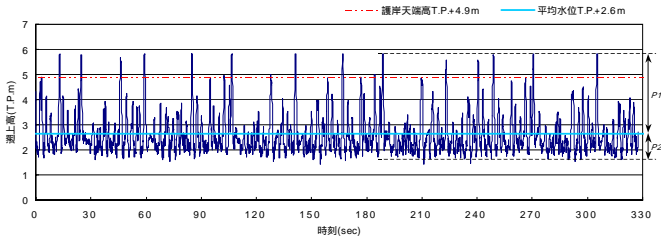


図-5 傾斜護岸における遡上高の経時変化

打ち上げ高を成分波単位と時系列単位で評価したが(図-6)、時系列評価では5%程度、成分波評価では22%程度の頻度で越波が発生することとなった。

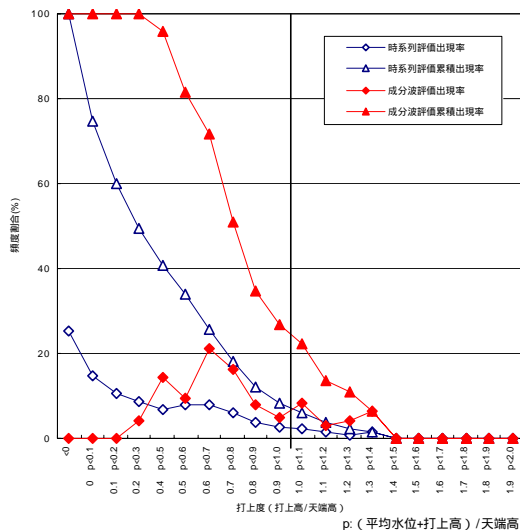


図-6 打ち上げ高出現頻度図

### 3.4 模型の縮尺効果に関する検討

透水性構造物内の水の流れは通常は乱流状態で流れているが、流速が小さくなると層流状態で流れており、その場合に固体部分に作用する力は粘性抵抗が主になる。乱流が支配的な流れの水力模型は Froude の相似則で、層流が支配的であれば Reynolds の相似則で操作されなくてはならない。したがって消波工のような透水性構造物では、本実験のような Froude 模型の流れが、乱流が支配的であることを確認しておくことが必要である。

遷移領域にある透水性構造の一次元定常流の運動方程式は下式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} = u(\alpha + \beta |u|) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $u$  は速度、 $p$  は水圧である。これをもとに長さ  $l$  の損失水頭  $\Delta h$  は、

$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{u}{g} (\alpha + \beta |u|) = \left\{ 2\left(\beta + \frac{\alpha}{|u|}\right) \right\} \cdot \frac{u |u|}{2g} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\alpha$ 、 $\beta$  は層流、乱流の抵抗係数であり、下式で近似される。

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \{(1-\lambda)^3 / \lambda^2\} \cdot (\nu / d^2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \{(1-\lambda) / \lambda^3\} \cdot (1/d) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\alpha_0$ 、 $\beta_0$  は主として固体形状で決まる無次元係数であり、下表のように与えられる。 $d$  は個体の代表寸法、 $\nu$  は動粘性係数で 10°C では 0.013 (cm<sup>2</sup>/s) である。

式(2)で乱流抵抗力に対する層流抵抗力の比を取ると、

$$r_1 = \frac{\alpha}{\beta |u|} = \frac{\alpha_0 \{(1-\lambda)^3 / \lambda^2\} \cdot (\nu / d^2)}{\beta_0 \{(1-\lambda) / \lambda^3\} \cdot (1/d)} \cdot \frac{1}{|u|} = \left( \frac{\alpha_0}{\beta_0} \right) \cdot \lambda (1-\lambda)^2 \cdot (\nu / |u| d) \quad \dots\dots\dots (7)$$

石や異形ブロックの  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$  は近藤ら<sup>3)</sup>が求めた値があり、それらの中から代表的なものを、表-1に挙げ、それから得られる  $\alpha_0 / \beta_0$  を同表の下端に示す。

表-1  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$  および  $\alpha_0 / \beta_0$

個体種類 係数	テトラポット	六脚	ホースケヤ	石
$\alpha_0$	2100	19000	800	1200
$\beta_0$	2.2	7.1	1.4	2.4
$\alpha_0 / \beta_0$	950	2700	570	500

緩傾斜護岸を対象とする  $r_1$  を求めることにする。代表的な水平水粒子速度  $u$  の代表値として、ここでは堤端前面水深 ( $h=4.2m$ ) における静水面の水平方向速度の1/2を用いることとする。微小振幅波理論によると、

$$|u| = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \right\} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi H}{T} \cdot \left\{ \frac{1}{\tanh(kh)} \right\}_{z=0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)を(7)に代入し、微小振幅波の分散の式を用いて書き改めると次式が得られる。

$$r_1 = \{4\nu\lambda(1-\lambda)^2 / gd\} \cdot (\alpha_0 / \beta_0) \cdot (L/TH) \quad \dots\dots\dots (9)$$

本実験において、実験値より  $h=12.0cm$ 、 $T=1.7sec$ 、 $H=5.0cm$  において、模型ブロックに形状が酷似しているホースケヤの  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$  を使い、 $\lambda=0.4$ 、 $d=5.0cm$  として推定した  $r_1$  は、

$$r_1 = \{4 \cdot 0.013 \cdot 0.4(1-0.4)^2 / 980 \cdot 5.0\} \cdot 570 \cdot (180 / 1.7 \cdot 5.0) = 0.032$$

これより層流項の占める割合は全体の約3%に過ぎず、乱流が支配的であることが知れた人工リーフについては

作用する波高が大きいから、 $r_1$ はさらに小さい。

従って Froude 相似則による人工リーフの波浪変形、透過性護岸の打ち上げに関する本実験では、縮尺効果による誤差は計測誤差を超えるものではなく、無視できると判断される。

#### 4. 実験結果および考察

波の打ち上げ高が既設護岸天端高で満足させるために、人工リーフ天端の拡幅および天端高の嵩上げ、人工リーフ上または前面に消波ブロックを設置するなど、数ケースの実験を実施した。人工リーフ部のみならず、緩傾斜護岸の基礎天端をテラス状に延長および嵩上げたケースについても検討した。人工リーフおよび緩傾斜護岸の形状による打ち上げ特性は以下のとおりである。

##### (1) 人工リーフ天端拡幅

リーフ天端幅が広いほど打ち上げ高が小さくなる傾向がみられた。しかし、当該海岸では漁業利用上の点から沖合への拡幅が不可能であるため、岸方向に拡幅した。徐々に拡幅していき、遊水部を埋め尽くすまで拡幅したが打ち上げ高が既設天端高を満足することはなかった。

##### (2) 人工リーフ天端嵩上げ

リーフ天端高が高いほど打ち上げ高は小さくなるが、天端高を H.W.L.=T.P.+0.7 まで嵩上げし、さらに天端幅を 50m に拡幅しなければ、打ち上げ高は満足されなかった。天端高が高いため、水塊が逃げ場を失い、遊水部における水位上昇量が顕著であった。

##### (3) 消波ブロックの設置

消波ブロックを人工リーフ上に 2 層積みで設置した場合には、十分に打ち上げ高は満足された。人工リーフの天端高を H.W.L.まで嵩上げし、さらに前面に消波ブロックを設置した複断面では、打ち上げ高を満足しなかった。いずれの場合も、(2)同様に水位上昇量が著しかった。

##### (4) 緩傾斜護岸基礎天端の拡大

緩傾斜護岸の基礎をテラス状に拡幅することで、その基礎天端上で波は砕波しエネルギーが減衰する。天端幅が広いほどエネルギーは減衰し、天端幅 30m 以上の場合には打ち上げ高を満足した(写真-3)。これらの結果を総合的に判断して、緩傾斜護岸の基礎天端を嵩上げおよび拡幅した図-7 の断面を最適改良断面として提案する。



写真-3 模型設置状況(テラス状断面)

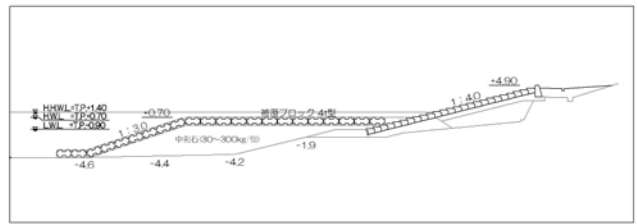


図-7 標準断面図

#### 5. むすび

本報告による主要な結論をまとめると以下のようになる。

- 竹浦海岸沖合で観測した波浪スペクトル特性から、模型波スペクトルを作成した。
- 透過性防波構造物の水理模型の縮尺効果について、基礎式に準拠して検討し、本実験の縮尺効果は無視できる範囲であることを確認した。
- 打ち上げ高を有義打ち上げ高によって評価する方法を提案し、それによって人工リーフ-緩傾斜護岸の各種断面の打ち上げに関する効果を比較し、評価した。

**謝辞:** 本実験は、「平成 16 年度 竹浦海岸侵食対策工事(道州制)模型実験」で実施されたものである。実験遂行に際し協力頂いた、北海道胆振支庁室蘭土木現業所治水課 清水研二漁港係長、同登別出張所(当時) 福田健二漁港係長、北海道建設部砂防災害課 加藤隆主査、北海道水産林務部 漁港漁村課 沼田辰巳主査に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 北海道：竹浦海岸侵食対策事業 全体計画書(平成 10 年度)
- 2) Ochi, M.K.: Ocean Waves -The Stochastic Approach-, Cambridge Univ. Press.1998.
- 3) 近藤一郎・竹田英章：消波構造物、森北出版, 1983