

人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究

浅川 勉*・佐藤弘和**・口ノ町誠**・野口正昭**

1. ま え が き

近年、景観や海水交換性等に配慮した構造物として幅広潜堤や人工リーフ工法の施工例が増えつつある。これら人工リーフ被覆材の安定性に関しては、河野ら(1991)、水谷ら(1991)による基礎的研究や宇多ら(1988, 1990)の実験的研究に基づく被覆材所要重量算定法の提案等がある。しかし、宇多らの研究は規則波により被覆石の安定を検討したものであり、不規則波の場合や被覆材としてコンクリートブロックを用いた場合の適用性については明らかでない。本研究は一層被覆ブロック(エックスブロック)を用いた不規則波による安定および波力実験を行い、所要重量算定法を検討するとともに、リーフ背後の水位上昇量、波高伝達率を測定したものである。今回の実験では、実際の施工例を参考とし、主として碎波帯を中心とした検討を行った。

2. 潜堤・人工リーフの施工例について

水理模型実験における実験条件を設定するため現地での潜堤・人工リーフの施工例を調査・解析した。

図-1は、潜堤および人工リーフの施工例(約70例)についての調査結果の一例であり、設置水深(h)についてまとめたものである。設置水深は2~12m程度まで広く分布しているが、3~5mの施工例が多い。天端上水深(R)は-0.5(静水面上)~4m程度に分布し、0~2mの場合が多い。天端幅は5~90mの広い範囲に分布しているが、人工リーフとしては40~60mの施工例が多い。被覆材としてコンクリートブロックが用いられた場合のブロック重量は10t以下のものが多く、なかには30t以上のブロックを用いた施工例も見られる。堤体の前面法勾配は1:1.5~1:5の範囲であるが、1:3のものがほとんどである。設計波の周期は6~15秒の広い範囲に分布しているが、周期が短い場合の施工例は内湾に多い。

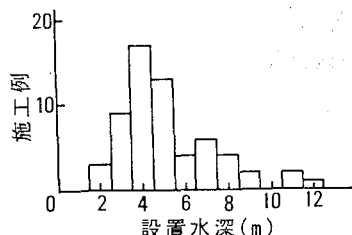


図-1 潜堤および人工リーフの施工例

3. 実験装置および実験方法

本研究では、作用波力を測定する実験(実験Ⅰ)および被覆ブロック模型による安定実験(実験Ⅱ)の2種類の実験を行った。実験水槽は日本テトラポッド(株)応用水理研究所の2次元造波水路(長さ54m、幅1.5m、高さ1.2m)を用いた。

実験Ⅰでは、1/60勾配斜面上に天端幅100cm、前面法勾配1/3の人工リーフを設置した。捨石マウンドは碎石とし、表面をコンクリート方塊を想定した矩形断面片持梁で被覆した。片持梁はアクリル製とし、図-2に示すように5ヶ所に揚圧力測定用のひずみゲージを取りつけた。リーフの高さは12cmで一定とし、水位の変化で設置水深(h)および天端上水深(R)を変化させた。実験波は修正ブレッドシュナイダー・光易型のスペクトルをもつ不規則波とし、3種類の有義波周期 $T_{1/3}$ (1.2, 1.5, 2.0秒)それぞれについて沖波波高を8種類変化した。測定は204.8秒間行い、その間の最大波力および大きい方から5波までの平均値を求めた。

実験Ⅱでは、1/30勾配斜面上に人工リーフ模型を設

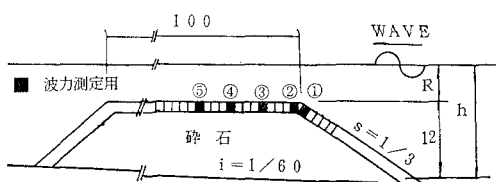


図-2 波力測定用リーフ模型(単位: cm)

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 技術部 副部長

** 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所 研究開発室

置した。リーフの諸元は前述の施工例を参考とし、模型縮尺 1/50 を想定して設定した。実験では前面法勾配は 1/3、天端幅は 1m (現地 50m 相当) で一定とし、設置水深および天端上水深を変化させた。被覆材には 16.2, 31.7, 82.4 gf の 3 種類の重量のエクスブロックを用い、基礎マウンドには 3~4 gf の碎石を用いた。リーフ高さおよび天端定水深の組合せを表-1 に、実験断面を図-3 に示す。実験波は不規則波とし、有義波周期 $T_{1/3}$ を 3 種類 (1.0, 1.5, 2.0 秒) 変化させた。波高は各ブロック重量毎に順次大きな波を作用させ、安定限界波高を含むように 3~6 種類変化させた。ブロックの積み換えは波作用毎に行い、実験波を 24 分間 (現地 3 時間程度) 作用させ、転落・飛散・動揺するブロックを観察した。各実験断面、実験波浪の組合せから実験は約 160 ケースであった。また、安定実験時のリーフ背後法肩における水位記録から平均水位上昇量および波高伝達率を求めた。

4. 実験結果および被覆材所要重量算定法

4.1 被覆材重量算定式について

傾斜堤や混成堤被覆マウンド被覆材の安定性は、ハドソンの K_D 値およびプレブナードネリーの安定係数 N_s によって実務的に広く議論されている。後者の所要重量算定における基本式は次のようである。

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H_s^3}{N_s^3 \cdot (S_r - 1)^3} \quad \text{.....(1)}$$

ここに、 W : 被覆材所要重量, H_s : 有義波高, γ_r :

被覆材の空中単位体積重量, S_r : 被覆材の海水に対する比重である。実験的に安定係数 N_s を求めることにより、所要重量 W の算定が可能となる。

一方、流れの場においては流速の 6 乗に比例する重量算定式が求められている。宇多ら (1990) は人工リーフの安定性に関しこの 6 乗則を基本とした被覆材重量算定法を提案した。人工リーフを対象とする場合、流速を適切に評価するのは困難な場合があり、本研究では実務的な利用も考慮し、結果的には式 (1) を基本とした。

さらに、Van der Meer (1987) はハドソン式と式 (1) より $H_s/4D_{n50}$ (D_{n50} : 被覆石の中央粒径, $4 : S_r - 1$) が N_s と同義で、捨石傾斜堤の安定性の議論に有効であることを示した。式 (1) について被覆材をコンクリートブロック (高さ : D) とすると、 $W = \gamma_r K_V D^3$ (K_V : 体積に関する形状係数) であるから $H_s/4D = N_V^{1/3} N_s$ となり、 $H_s/4D$ は N_s と同義となる。一層被覆ブロックの場合、その形状はブロックの種類により大きく異なるので、それぞれのブロックで基本高さ D を設定し、かつその D が被覆面積当りのコンクリート量と関連づけられるならば、 $H_s/4D$ により経済性をも考慮した安定性の議論が可能であろう。この場合、安定式は以下の形となる。

$$4D = A \cdot H_s \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 A は被覆材の比重・形状や人工リーフの設置条件等によって定まる係数である。

4.2 波力測定実験結果 (実験 I)

波力実験は、波の継続時間が 205 秒で、不規則波による被覆材の安定実験と比較して短い事、一層被覆ブロックでは状況により 1 個でも移動すれば被災と見なす事などを考慮して揚圧力の最大値に着目して整理を行った。

図-4 は、人工リーフ被覆材の被災が多い天端法肩水平部 (② : 図-2 参照) の揚圧力の最大値 ($P_{V2 \max}$) を沖波波高との関係で示したものである。また、図-5 は波高としてリーフ法肩位置での通過波をとり同様に整理したものである。両者とも、波高の小さい範囲では揚圧力は波高に比例して増加するが、ある波高ランク以上では横ばい状態となり、ほぼ一定の値となる。これは領域を分割する必要性を示唆しているので、以下波高と揚圧力が比例する範囲を領域 I、揚圧力が横ばいになる範囲を領域 II として区分する。安定性が沖波波高で議論する場合には特に重要であり、かつ規則波の実験結果とは異なるものと考えられる。図から周期の影響をみると、沖波波高で整理した場合、領域 I、II ともに周期の影響が明瞭で、周期の長い方が大きな揚圧力を与える。法肩位置での通過波による場合、領域 I では周期の影響はほとんど認められないが、領域 II では周期の長い方がやや大きな揚圧力を示す。

表-1 実験断面組合せ

		天端上水深 (R)			
		0	2	4	6
リーフ の高さ (d)	6	○	○	○	—
	10	—	○	○	○
	14	—	○	○	○

単位 : cm

注 : d, R はブロック重量 82.4 gf での数値である

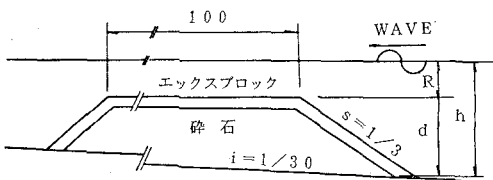
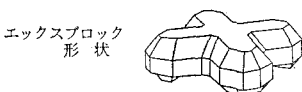
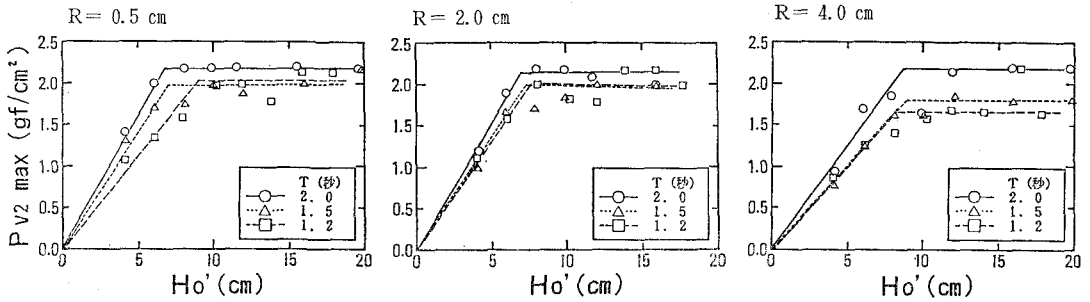
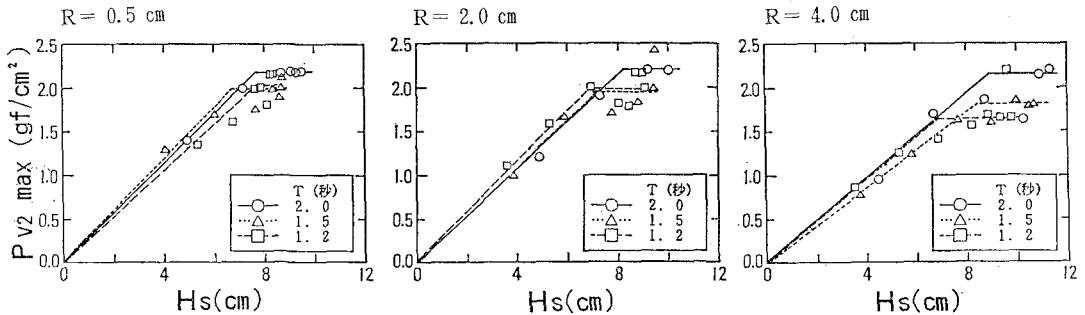


図-3 安定実験用リーフ模型 (単位 : cm)



図—4 沖波波高と最大揚圧力の関係



図—5 通過波高と最大揚圧力の関係

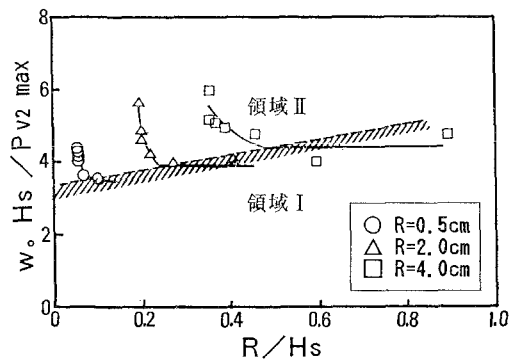
波力実験の結果を要約すると次のとおりである。

- ・領域Ⅰ（波高と揚圧力が比例する範囲）と領域Ⅱ（揚圧力が横ばいとなり一定値に近づく範囲）を考慮する必要がある。
- ・領域Ⅰでは、沖波波高で整理する場合、周期の影響が明瞭であるが、通過波高で整理すると周期の影響は非常に小さくなり、実務的に周期に依存しない形でまとめることができると考えられる。
- ・領域Ⅱでは、沖波波高と通過波高のいずれにおいても周期の長い方が大きな揚圧力を与える傾向にある。
- ・領域Ⅰでは式（2）の形式の算定式が成立する。領域Ⅱでも通過波を用いれば、 H_s が横ばいとなるので実務的には式（2）が近似的に成立するように、適切な係数 A の設定が可能と考えられる。

図—6 は、潜堤や混成堤マウンド被覆材の安定上重要なパラメータである R/H_s に着目し、 $T=2\text{ sec}$ の揚圧力測定結果を示したものである。縦軸には安定数 N_s や $H_s/\Delta d$ と同様の意味を持つ無次元量 $H_s/(P_V/w_0)$ を用いた。ここで、 w_0 は水の単位体積重量である。同じ条件で波高ランクのみを変化させた場合、領域Ⅰでは R/H_s が変化しても $H_s/(P_V/w_0)$ は一定なので図では水平な直線となる。領域Ⅱでは P_V が一定で H_s が若干増加するため左上がりの曲線となる。この形の重量算定図を考える時、図—6 の特性に留意する必要がある。通常人工リーフの場合、設置水深が比較的浅く、設計波に

対しては大部分が領域Ⅰと領域Ⅱの境界付近あるいは領域Ⅱの範囲に位置する。このように実際の設計条件を考慮しかつ実験範囲に注意するならば、 N_s の下限値が設定できるので図—6 のタイプの算定図が可能であると考えられる。

一方、 $H_s/(P_V/w_0)$ が堤体の設置条件に強く関係している点に着目すると、 R/h をパラメータとして用いることが考えられる。このパラメータの利点は、 R/h が同一条件の場合は領域Ⅰでは $H_s/(P_V/w_0)$ は一定値を示し、かつ領域Ⅱに移行するに従い、 $H_s/(P_V/w_0)$ が大きくなる点にある。つまり、領域Ⅰでの $H_s/(P_V/w_0)$ が波高ランクによらず、一定の下限値を与えるので、実

図—6 無次元最大揚圧力と R/H_s の関係 ($T=2\text{ sec}$)

務的にはこの下限値を用いることができる。図-7 は $T=2\text{sec}$ の揚圧力測定結果をプロットしたものである。下限値は領域Ⅰの範囲のデータで与えられる。

さらに、リーフ天端水平部での法肩からの距離によって期待される揚圧力低減効果を検討するため、天端部に 12 cm 間隔で 4 ケ所にひずみゲージを取り付けた。 $R=0.5\text{cm}$ の測定結果を、縦軸に法肩での最大揚圧力 $P_{V2\text{max}}$ で標準化し、横軸には $X/T\sqrt{gH_s}$ (X : 法肩からの距離) を用いて、図-8 に示した。 $R=0.5\text{cm}$ の場合、低減効果はかなり大きい。周期による相違は、法肩からの距離を $X/T\sqrt{gH_s}$ で無次元化する事により同じ低減率で議論できると思われる。 $R=2.0, 4.0\text{cm}$ の場合の測定結果はほぼ同じであり、 $R=0.5\text{cm}$ に比較して低減率はかなり小さい。

4.3 安定実験結果 (実験Ⅱ)

前述した波力測定結果を参考とし、安定実験結果から被覆材の所要重量算定法について検討を行った。

図-9 は横軸に R/H_s 、縦軸に安定係数 N_s を用いて安定実験結果を整理したものである。安定、不安定の境界が比較的明瞭であり、図に示したように不安定および安定限界の下限値を用いて設計上の N_s を求めた。使用しているパラメータが簡単なので、利用上は非常に便利である。

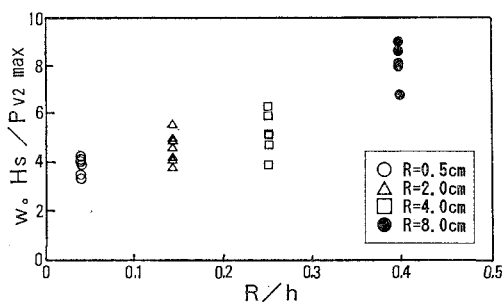


図-7 無次元最大揚圧力と R/h の関係 ($T=2\text{sec}$)

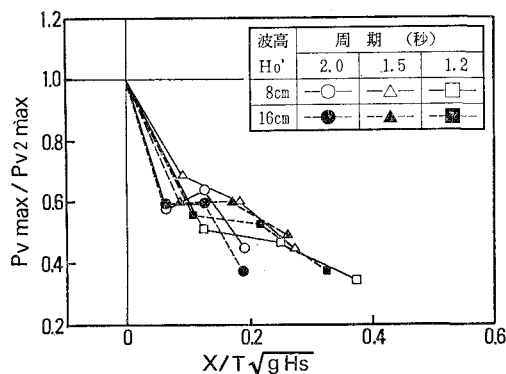


図-8 最大揚圧力の減衰特性 ($R=0.5\text{cm}$)

図-10 は、横軸に R/h を用い、縦軸に $H_s/4D=1/A$ を用いたものである。図では安定実験結果から安定限界を示す条件のみをプロットしている。この場合、データのバラツキがあるものの周期の影響が出ているので、 h/L をパラメータとして整理し、揚圧力測定結果の考察で述べた点を考慮し、それぞれの範囲で下限値付近で線を引いた。周期の影響がみられるのは、揚圧力測定結果で領域ⅠとⅡの境界付近から領域Ⅱにかけての周期による揚圧力の差が出ているためと考えられる。ただし、今回の実験範囲は法面勾配および海底勾配が限定された条件であるので、今後さらに検討を進める必要がある。

4.4 水理機能実験結果 (実験Ⅱ)

a) 波高伝達率

安定実験時におけるリーフ背後法肩での水位記録より換算沖波波高で定義した波高伝達率 H_u/H_0' を求めた。

図-11 に今回の実験結果と築造基準 (1987) および宇多ら (1989) のデータと比較したものを示す。築造基準 (1987) は規則波による捨石を用いた人工リーフの実験結果であり、宇多ら (1989) は規則波によるエクスポックを用いた実験結果である。今回の不規則波実験結果は既往の規則波実験結果と基本的には同様の傾向を示しているものの、 R/H_0' が大きい場合には既往の実験結果より小さく、 R/H_0' が小さい場合にはこれより

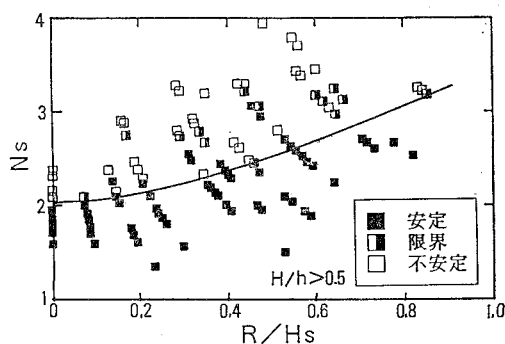


図-9 エクスポックの安定係数 (N_s)

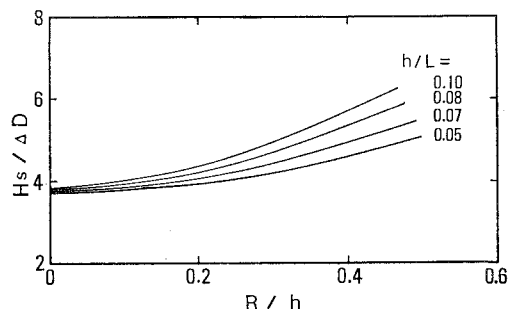


図-10 エクスポックの安定係数 ($H_s/4D$)

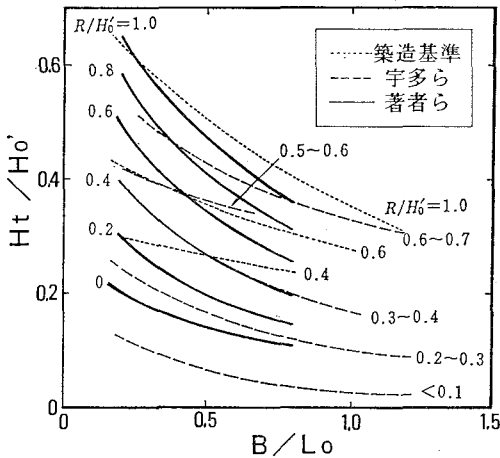


図-11 波高伝達率測定結果

大きい傾向にある。これは、規則波と不規則波の相違によるものと考えられ、特に $R/H_o' < 0.1$ の領域では不規則波による波高伝達率は規則波による波高伝達率の2倍以上になり、人工リーフの設計にあたってはこの点に留意する必要がある。

b) 水位上昇量

安定実験時におけるリーフ背後法肩での水位記録より平均水位上昇量 (η) を求めた。測定結果から、横軸に R/H_o' を使い、縦軸に η/H_o' を用いて整理した結果を図-12に示す。 η/H_o' は R/H_o' の増大につれて減少し、 $R/H_o' > 1$ ではほとんど0になる。図中には宇多ら (1988) による規則波を用いた捨石による人工リーフの水位上昇量および浜口ら (1991) による不規則波を用いた捨石による人工リーフの水位上昇量も一緒に示した。これによれば規則波と不規則波による相違、被覆材による相違が明瞭である。

5. まとめ

人工リーフの一層被覆ブロック (エックスブロック) の安定性を不規則波実験により検討した結果をまとめると以下のとおりである。

- ・堤体位置での通過波高 H_s によって安定係数 N_s を求めることにより式 (1) のタイプの安定式が、設計における実務上成立するものと判断された。
- ・揚圧力測定結果から安定条件を判断する指標として

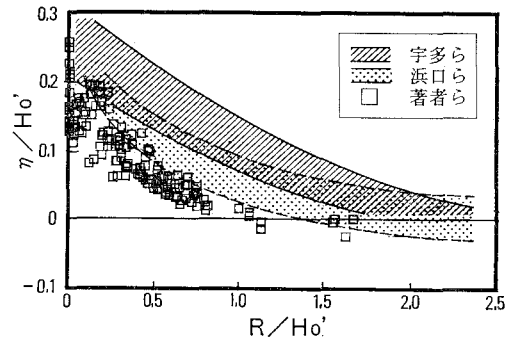


図-12 水位上昇量測定結果

R/H_s および R/h が利用できることがわかり、かつそれぞれの指標の特性をみることができた。

・所要重量算定図として 図-9 および 図-10 を得た。設計においては両者の特性を勘案の上、適切な重量を算定できる。ただし、実験条件には限界があるので、条件をはずれたものについては留意が必要である。

・人工リーフの水理機能は、規則波、不規則波による相違および被覆材の相違により異なり、設計にあたっては不規則波を用いた系統的な検討が必要と考えられる。

今後の課題としては、人工リーフ前面法勾配および海底勾配を変化させた実験をさらに進め、それらの影響を適切に評価することが必要である。

参考文献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, 71 p.
- 宇多高明・坂野 章・竹淵 勉 (1989): 高知海岸人工リーフ水理模型実験報告書, 土木研究所資料, 第2782号, p. 10.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友信 (1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 土木研究所資料, 第2893号, 48 p.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987): 改訂海岸保全施設築造基準解説, 全国海岸協会, p. 269.
- 河野二夫・高野重利 (1991): 捨石潜堤の安定性に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 586-590.
- 浜口敬知・綿貫 啓・長谷川実・野口正昭 (1991): 水産協調型潜堤の開発, 日本水産工学会学術講演会論文集, pp. 67-68.
- 水谷法美・岩田好一郎・Teofilo Monge Rufin, Jr.・倉田克彦 (1991): 幅広潜堤上の被覆材に作用する波力の特性と移動限界に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 591-595.
- Van der Meer, J.W. (1987): Stability of Breakwater Armour Layers—Design Formulae, Jour. Coastal Eng. Vol. 11, pp. 219-239.