

# 人工リーフ被覆材の飛散機構に関する研究

田中茂信\*・岩崎福久\*\*・茂木祐治\*\*\*

## 1. ま え が き

近年、全国各地の海岸で消波工や離岸堤に替わって人工リーフの設置事例が増えてきている。この人工リーフは、天然の珊瑚礁が持つ優れた消波機能にヒントを得た幅広の潜堤であり、その沖側法面や天端上で強制砕波させることにより、背後域への打ち上げ高や越波量を軽減させる消波構造物である。人工リーフ工法はそれまで越波対策や侵食対策として設置されてきた消波工や離岸堤などの工法が景観や海浜へのアクセスを阻害するとして、その代替工法として注目を集めている。

宇多ほか(1990)は、模型実験をもとに人工リーフの被覆材の所要重量算定手法を提案している。現在の人工リーフ設計手法の一つである「人工リーフの設計の手引き」(1992)はこの研究を基にしてつくられた。この宇多ほかの実験で用いた人工リーフの模型は碎石によって構成されており、その被覆材の安定性はリーフ上で生じる岸向き最大流速に支配されると仮定し、被覆材の所要重量をリーフの諸元と沖波条件によって算定できるとしている。ところが近年施工されている人工リーフのほとんどが、その表面をコンクリートの被覆ブロックで覆ったものであり、碎石のみで構成されている人工リーフは少ない。この理由としては人工リーフの被覆材の所要重量に見合った自然石あるいは碎石を確保するのが難しいためと、かみ合わせ効果のあるブロックで被覆した場合、その所要重量がかなり軽減できることが期待されるからである。ブロックの所要重量は「人工リーフの設計の手引き」によると、模型実験によりその算定式の定数を定めることとしている。また、碎石のリーフでは生じなかった現象が、ブロックのリーフで生じることも考えられるため、その検証も必要となってくる。被覆材にコンクリートブロックを用いたリーフの設置が今後ますます増えると考えられるため、その所要重量算定手法の確立が急務となっている。本研究では人工リーフ被覆材にコンクリートブロックを用いた場合、被覆材が飛散する場合

にどのような外力が加わっているのか、またその場合の波の位相・砕波形態を明らかにすることを目的とし模型実験を行った。

## 2. 研究内容

### 2.1 概 要

建設省海岸課と土木研究所海岸研究室で実施した人工リーフの実態調査によれば、現地における人工リーフ被覆材の被害はリーフ天端肩部から天端中央部に集中していることがわかっている。また予備実験により、天端水深が異なると被覆材の飛散形態が異なったことから、天端水深の大小で飛散機構の違いがあることが予想された。また、リーフ周辺の波・流れ場の変化と被覆材の安定性との関連を調べるために以下に示す項目について実験を行った。

- 1) 砕波波高・砕波位置の測定と砕波形態の観察
- 2) 被覆ブロックに加わる圧力と被覆ブロック周辺の波形・流速の測定および被覆ブロックの移動状況の観察

### 2.2 実験方法

#### a) 実験条件

実験は建設省土木研究所の二次元造波水路(長さ52m, 幅0.6m, 深さ1.2m)を用いて行った。水路内に勾配が1/10の部分と1/30の部分から構成された木製固定床を設置し、これを海底床とした。図-1に水路の断面と人工リーフ模型設置位置を示す。模型縮尺は1/30とした。図-2に人工リーフの模型断面図を示す。人工リーフ模型は碎石と被覆ブロックから構成され、前面法勾配は1/3、天端幅を1.5mとした。天端水深 $R$ は5, 10, 15cmの3ケースを考えた。さらに、人工リーフの設置位置を変えて、リーフの天端から法先までの高さ $h_r$ (リーフ高)が20cm(リーフ1)と30cm(リーフ2)について実験を行った。被覆材に用いたコンクリートブロックはモルタルまたは樹脂製であり、現地換算重量で2tf, 3tf, 4tfのものである。今回の実験では、水路横断方向同一断面上に、重量の異なるブロックを配した。そして最も重量が大きく、安定である4tf型のブロックに圧力計を取付け、安定移動状況の観察と波高・流速・圧力の測定を同時に行った。また今回実験で用いた被覆材は、現地では

\* 正会員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室長

\*\* 正会員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室研究員

\*\*\* (株)ゼックス (元建設省土木研究所海岸研究室部外研究員)

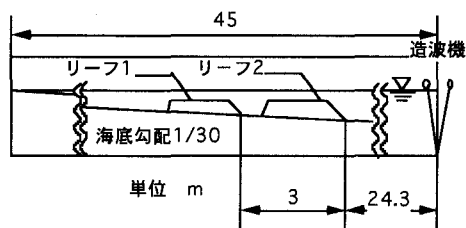


図-1 実験水路およびリーフ模型設置位置

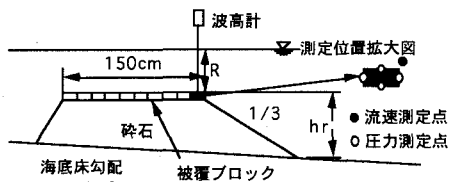


図-2 人工リーフ模型断面と計測位置

千鳥配置で使用するものであるが、噛み合わせ効果を排除するために格子状に配置した。

波の条件は沖波波形勾配を一定とし、予め行った予備実験により、被覆材が移動した限界波高 ( $H_c$ ) を調べておき、 $H_c+3$  cm,  $H_c$ ,  $H_c-3$  cm,  $H_c-5$  cm の4ケースを行った。ただし、リーフ1の天端水深が10, 15 cmの場合とリーフ2の場合の天端水深が10 cmの場合は被覆材が移動しなかったことから、被覆材が最も動揺した波高付近で波高条件を設定した。波高を高くしても被覆材が飛散しなかった理由は、波高をある値以上に上げた場合、リーフ法先よりも沖側で碎波し、リーフに到達するまでに減衰するため、被覆材を飛散させるのに十分な力が働かなかったためである。表-1に今回行った実験条件と碎波波高および碎波位置を示す。表中の  $X_b$  はリーフ沖側法肩から碎波位置までの距離を表したものであり、法肩から沖側を正とした。また被覆材の飛散の有無を併記してある。被覆材が飛散した場合はケース2-3-3を除き、法肩より沖側で碎波している。また、碎波の形式はケース1-1-3, 4は砕け寄せ波であり、ケース1-3-4は崩れ波であった。そのほかのケースは巻き波であった。

b) 実験方法

図-2に水面波形・流速・圧力の測定点を示す。それぞれの測定には容量式波高計・2成分レーザー流速計・波圧計を用いた。これらの測定と同時に被覆ブロックの移動状況を目視によって観察した。その際、被覆ブロックの移動・脱落の状況と波の位相の対応も観察した。波高、流速、圧力は測定間隔0.01sで、フロッピーディスクに収録した。

実験の際、波を起し始めてからある程度の時間がたつと、碎波により人工リーフ周辺の水位が上昇する。こ

表-1 実験条件

ケース	$h_r$ (cm)	$R$ (cm)	$H_c$ (cm)	$T$ (sec)	$H_b$ (cm)	$X_b$ (cm)	飛散有無	
1-1-1	20 (リーフ1)	5	11.0	1.35	9.6	3	無	
1-1-2		5	12.9	1.47	12.5	4	無	
1-1-3		5	15.3	1.62	9.2	31	無	
1-1-4		5	19.1	1.76	20.6	51	有	
1-2-1		10	17.6	1.71	21.9	15	無	
1-2-2		10	19.2	1.79	19.9	-9	無	
1-2-3		10	19.6	1.85	22.1	-28	無	
1-2-4		10	20.9	1.85	23.1	39	無	
1-3-1		15	18.3	1.71	19.9	-21	無	
1-3-2		15	19.8	1.81	21.5	-28	無	
1-3-3		15	24.3	1.92	26.9	9	無	
1-3-4		15	25.3	2.03	25.6	131	無	
2-1-1		30 (リーフ2)	5	11.9	1.40	11.1	4	無
2-1-2			5	14.0	1.50	14.5	14	無
2-1-3			5	17.0	1.64	15.4	10	無
2-1-4			5	19.9	1.80	17.0	10	有
2-2-1	10		15.3	1.56	15.9	-6	無	
2-2-2	10		17.0	1.66	18.5	1	無	
2-2-3	10		20.5	1.73	21.7	-15	無	
2-2-4	10		23.1	1.93	26.9	5	無	
2-3-1	15		18.7	1.72	21.1	-16	無	
2-3-2	15		21.3	1.80	23.0	-2	無	
2-3-3	15		23.8	1.97	28.2	-7	有	
2-3-4	15		27.6	2.07	32.1	12	有	

の水位上昇の影響が及ばないデータを解析の対象とした。さらに生データのパワースペクトルから、10 Hz以上の高周波成分と0.2 Hz以下の低周波成分の影響は小さいと判断されたので、これを生データから取り除いた。さらに圧力を被覆材に加わる力に換算した。

3. 実験結果

3.1 被覆ブロックの飛散状況

被覆材の飛散はリーフ1 (リーフ高20 cm) では天端水深が5 cmの場合に生じ、天端水深が10 cm, 15 cmの条件では生じなかった。また、リーフ2 (リーフ高20 cm) では天端水深5 cmと15 cmの条件で生じ、天端水深10 cmでは生じなかった。リーフ2の天端水深15 cmの場合は、リーフ法面から天端にかけて碎波する条件で被覆材が飛散した。このとき被覆材は波の峰通過直後に被覆材の沖側が浮き、その後岸側に剥がれるよう移動した。一方、天端水深5 cmの場合は、リーフ1ではリーフ法先から法面にかけて碎波する条件で、リーフ2では法面で碎波する条件で被覆材が飛散した。リーフ1の場合、碎波後の水塊が直接リーフの肩や天端に衝突し、被覆材が吹き飛ばされるように移動している。リーフ2の場合は天端水深が15 cmの場合と同様に、波の峰通過直後に被覆材沖側から浮き初め、その後岸側に剥がれるよう移動した。

3.2 被覆材周辺の流れおよび被覆材に作用する力

次に、被覆材周辺の波形・流速および被覆材に作用する力を測定した結果を示す。代表としてリーフ1, 2の天端水深が5, 15 cmの場合における波高が最も高い条件での実験結果を以下に示す。図-3, 4はそれぞれリー

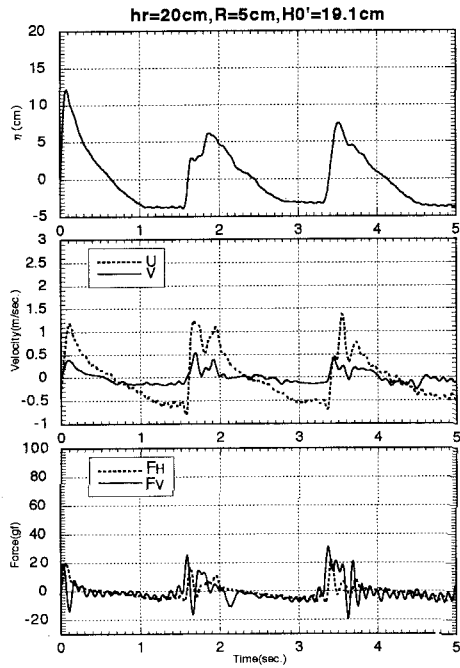


図-3 被覆材周辺の波形, 流速, 被覆材に作用する力 (ケース 1-1-4)

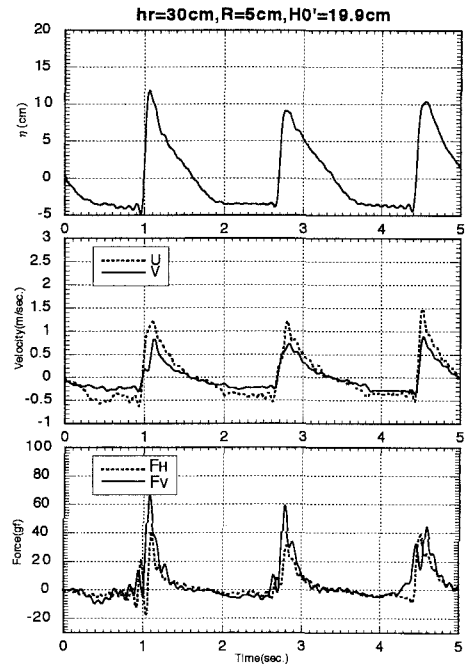


図-5 被覆材周辺の波形, 流速, 被覆材に作用する力 (ケース 2-1-4)

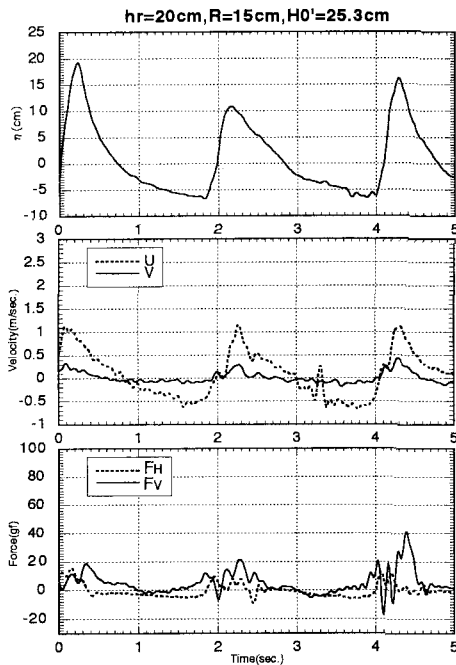


図-4 被覆材周辺の波形, 流速, 被覆材に作用する力 (ケース 1-3-4)

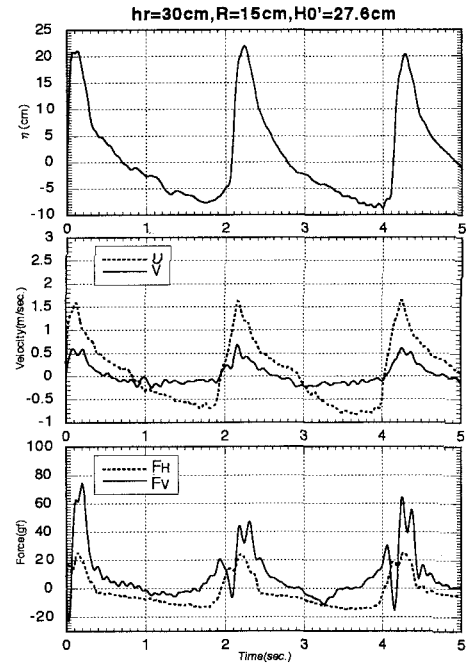


図-6 被覆材周辺の波形, 流速, 被覆材に作用する力 (ケース 2-3-4)

フ1の天端水深が5, 15 cmの結果である。また図-5, 6はそれぞれリーフ2の天端水深が5, 15 cmの結果である。図は上から順に、測定した被覆材直上の波形, リーフ材肩の水平・鉛直流速, 被覆材に作用する力の水平・鉛直成分である。流速と力の水平成分は岸向きを正, また鉛直成分は上向きを正にした。代表として選んだ図-3~6では, 図-4のリーフ1, 天端水深15 cmを除いて全ての条件で被覆材が飛散している。

まず, リーフ1の場合,  $U$  (水平流速),  $V$  (鉛直流速) は天端水深が小さい条件のほうが大きい条件に比べその立ち上がり急である。しかし流速の絶対値はほぼ同じである。また  $F_H$  (水平力),  $F_V$  (鉛直力) には0.2~0.3 s程度の短周期変動を持つ成分が含まれており, 大きな振幅のものは波の前面から峰の直後にかけて出現している。また  $U, V, F_H, F_V$  にそれぞれ複数のピークが見られる。この  $U, V$  の複数のピークのうち大きなものは, 波の立ち上がり部と, 波の峰通過時に見られる。ここで  $U, V$  のピークについては便宜上, 波の立ち上がり付近で生じているピークを前のピーク, 波の峰通過付近で生じているピークを後のピークと呼ぶことにする。

天端水深が5 cm, 15 cmの両方で,  $U$  のピークと  $V$  のピークは前, 後ともほぼ同一時刻で発生している。また  $U, V$  とも前のピークは波形  $\eta$  が0点を上向きに横切った直後で, 後のピークは波形のピークと同時刻で発生している。

次に,  $F_H$  の前のピークの出現は  $U$  が沖向きから岸向きに変わる点で, 後のピークは  $U, V$  の後のピークと同時刻である。一方  $F_V$  のピークは大きなもので3~4個あり, 最初に  $V$  が下向きから上向きに変わるとき, 波の峰通過時,  $U, V$  のピークが発生している時にそれぞれ対応している。このうち  $F_V$  の最も大きいピークは, 天端水深が小さい場合は最初のピークである  $V$  が下向きから上向きに変わる点で生じ, 天端水深が大きい場合は  $U, V$  の後のピークに対応している時に生じているのが特徴的である。

リーフ2の場合についても, リーフ1と同様の現象が起きている。ただし, リーフ2では天端水深が小さい場合は  $U$  と  $V$  の波形はほぼ同一の形状を示すが, 天端水深が大きくなると,  $U$  の振幅が大きくなるのに比べ,  $V$  の振幅はわずかに小さくなる。また,  $U, V$  のピークはリーフ1でいう前のピークが明瞭でなくなり, 後のピークのみになっている。

#### 4. 被覆材の飛散機構

##### a) 天端水深が大きい場合の飛散機構

天端水深が15 cmのケース2-3-4の場合, 被覆材は波の峰通過直後に被覆材の沖側が浮き, その後岸側に剝が

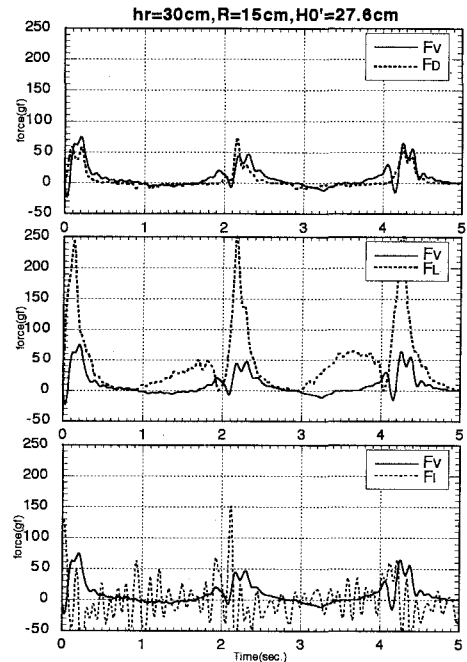


図-7 流速から計算した抗力と揚力および慣性力 (ケース2-3-4)

れるよう移動した。この場合の被覆材の飛散機構を考察すると, 被覆材は波の峰通過に伴う鉛直力によって被覆材沖側が鉛直上方に持ち上げられた後, 水平流れにより岸側へ移動すると考えられる。この機構を図-6の被覆材に作用する力から検討する。この条件で飛散した被覆材の水中重量は約40 gfであり, したがって被覆材を鉛直上向きに移動させるには  $F_V$  は40 gf以上であることが必要である。

被覆材に作用する鉛直方向の力  $F_V$  は3.3でも述べたように3つのピークを含んでいる。最初のピークは鉛直流速  $V$  が下向きから上向きに変わるときに生じているため, 鉛直流れの加速度成分に比例する慣性力によるものと考えられる。しかしこの最初のピークはたかだか20~30 gf程度であり, 被覆材を鉛直上方へ移動させるものではない。次に, その後生じるピークの値は, 波によってもバラツキはあるが45~75 gfという大きい値であり, 被覆材を上方へ移動させるのに十分な値である。したがって, この力によって被覆材は上方へ持ちあげられたものであると考えられる。また, そのピークは  $U, V$  のピークに対応していることから, 鉛直流れによる抗力か, 水平流れによる揚力であると考えられる。そこで, 鉛直流れによる抗力と, 水平流れによる揚力を計算した。ただし計算に用いた抗力係数, 揚力係数は1とした。

図-7は, 測定された流速から計算した鉛直流れによ

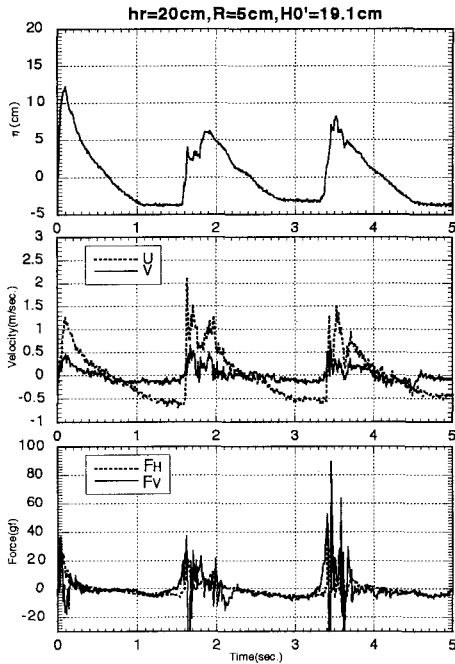


図-8 被覆材周辺の波形, 流速, 被覆材に作用する力  
(ケース 1-1-4, 100 Hz までの高周波成分を含む)

る抗力  $F_D$ , 水平流れによる揚力  $F_L$ , 鉛直流れの加速度成分から計算した慣性力  $F_I$  をそれぞれ  $F_V$  と対比して示してある。図-7 より  $F_V$  の後のピークは鉛直流速から計算された抗力により説明できる。また,  $F_V$  の先のピークは慣性力により説明できる。このことから, 天端水深が大きい場合の被覆材を飛散させる初期原因である鉛直力は, 鉛直流れによる抗力に支配されていると考えられる。

以上より, 天端水深が大きい場合の被覆材の飛散機構は次のようになる。まず, 鉛直流れによる抗力が被覆材に作用し, 被覆材が上方へ持ち上げられたところに, 水平流れが作用し被覆材は岸側へ移動する。

#### b) 天端水深が小さい場合の飛散機構

次に天端水深が 5 cm の場合の飛散機構はリーフ高によって異なると考えられる。すなわち, リーフ高が 20 cm のケース 1-1-4 の場合は, 砕波後の波前面に生じる bore 状の水塊の通過に伴う岸向き流れで被覆材の移動が生じたものであると考えられた。また, リーフ高が 30 cm のケース 2-1-4 の場合は飛散状況が a) の場合と同様であったこと, 流速・力の波形ケース 2-3-4 と相似な形状を示していることから, この場合の飛散機構は a) と同様の機構であると考えられる。よってここではケース 1-1-4

の場合のものについて検討する。図-3 からわかるようにケース 1-1-4 の鉛直方向の力  $F_V$  のピーク値は最大でも 30 gf であり, 被覆材を鉛直方向へ持ち上げるのに十分な値ではない。また  $F_H$  と  $F_V$  の合力についても計算してみたが, 被覆材を岸側へ回転させるような力にはなり得なかった。そこで考えられたのが, 短周期成分に含まれる衝撃力や流速に存在する乱れである。今回は 10 Hz 以上の高周波成分をカットしたが, ケース 1-1-4 の条件の 100 Hz までの成分を含んだものを図-8 に示す。この図と 10 Hz 以上をカットした図-3 を比較すると, 水平流速と鉛直力に特に大きな振幅をもつ短周期成分が含まれていることが認められる。この条件では図中の時刻 2 秒付近の波で飛散したが, 第 2 波目の水平流速が瞬間的ではあるものの 2.1 m/s という非常に大きな値を示していることから, この流れにより被覆材は吹き飛ばされるように, 岸側へ移動したのではないかと考えられる。しかし, その際に被覆材に作用している水平力・鉛直力はそれほど大きな値を示していない。

以上のように天端水深が小さい場合の被覆材の飛散機構には, 流速や作用する力に含まれる周期が 0.1 s 以下の短周期の変動の影響が及んでいる可能性があることがわかった。今後はこのように被覆材が移動するのに必要な力が働いていないにもかかわらず, 被覆材が飛散した現象の解明を, 流速に含まれる乱れや瞬間的に作用する衝撃力の面から検討することが課題となる。

## 5. 結 論

今回の研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 人工リーフの被覆材の飛散機構は天端水深と砕波位置によって異なる。
- 2) 天端水深が大きい場合の被覆材の飛散機構は鉛直流れによる抗力と水平流れが支配していることが考えられる。
- 3) 天端水深が小さい場合で, リーフ法先以深から法面にかけて砕波する条件で生じる被覆材の飛散機構には, 流速や被覆材に作用する力に含まれる周期が 0.1 s 以下の短周期の成分の影響が及んでいる可能性がある。

## 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, 79 p.  
 宇多高明・小俣 篤・斉藤友伸 (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.  
 建設省海岸課監修 (1992): 人工リーフの設計の手引き, 全国海岸協会, 94 p.