

人工リーフ被覆材の被害発生機構についての実験的考察

岡 本 俊 策*・河 野 茂 樹*

1. ま え が き

消波機能を持ち、景観を損なうことのない人工リーフは全国において計画・施工が進められている。人工リーフの設計に関しては、建設省において「人工リーフ設計の手引き」がまとめられており、その他にも被覆材の安定性と作用波力の関係、リーフによる消波特性、波高伝達率及び反射率、リーフ背後の水位上昇量等についても種々の研究がなされている（浅川ら，1992；泉宮ら，1992；岩田ら，1992；片野ら，1992）。しかし、実際の設計・施工においては、現場の条件が複雑なため、最適な断面や配置を行うことには多くの問題が残されている。特に、人工リーフの安全性を考える場合、実際に発生した被害状況の明確な分析が必要と思われる。そこで本研究においては、人工リーフの一層被覆ブロックの被災状況を観測するため、不規則波による安定及び波力実験を行い、被害発生状況やその時の碎波形態等を考察することで、より効果的で経済的な被覆方法やブロック形状を提案するための一助とする。

2. 安定 実 験

2.1 実験 内 容

人工リーフ被覆材の断面条件の違いによる被害発生状況を観測し、所要重量を算定するために、安定実験を行った。

実験は技研興業(株)総合技術研究所の2次元造波水路(長さ50m、幅1m、深さ1.6m)を用いて行った。実験縮尺は1/41とし、図-1に示すコンクリートブロック(現地換算8ton)を被覆材として用いる。人工リーフは海底勾配1/30の固定床に設置し、前面法勾配1/3、天端幅60m(現地換算)とする(図-2参照)。使用する不規則波の有義周期 $T_{1/3}$ は14秒(現地換算)とする。

断面条件は既設人工リーフの設計条件等を参考にし、

沖波波高 $H_0' \leq 12$ m

天端水深 $R=1, 2, 3, 4, 5$ m

設置水深 $h=5, 7.5, 10, 12.5, 15$ m

の中から、適宜選ぶものとした。

各断面において、1ストーム(300波)を作用させ、被覆ブロックの被害状況や碎波状態を観測し、作用後には以下に示す被害基準で被害率を算定した。 H_0' は適当と思われる値から1m(現地換算)ずつ上昇させていき、以下に示す実験終了条件を満足させた時にその断面での実験を終了とする。

① ブロック単体の被害定義

次の2種類で定義する。

①a)ブロックが元の位置から浮き上がり、その一部が周辺のブロックに乗り上げるか、完全に脱落して移動したもの

①b)ブロックが元の位置からブロック長 L 方向に $1/2 L$ 以上、又はブロック幅 B 方向に $1/2 B$ 以上移動したもの。

② ブロック全体個数の定義

次に示す人工リーフ天端部と法面部の合計値とする。

②a)天端部：法肩からの天端幅 $5H_0'$ の範囲に含まれ、水路両端のブロック個数を差し引いたもの

②b)法面部：法肩から法先までの範囲で、水路両端の

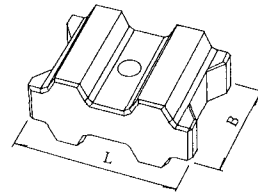


図-1 被覆ブロック

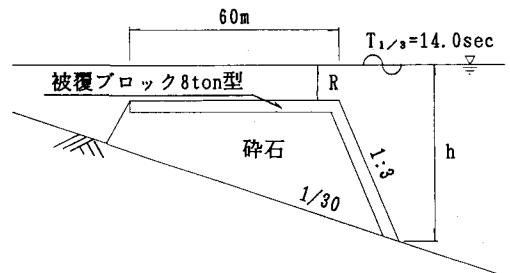


図-2 人工リーフ断面図

表-1 安定実験結果

No.	H_0' (m)	h (m)	R (m)	被害率(%)	No.	H_0' (m)	h (m)	R (m)	被害率(%)	No.	H_0' (m)	h (m)	R (m)	被害率(%)
1	3.0	15.0	1.0	0.0	6	7.0	12.5	5.0	0.4	11	3.0	7.5	1.0	0.0
	5.0	〃	〃	0.9		8.0	〃	〃	1.3		4.0	〃	〃	0.3
	6.0	〃	〃	6.9		9.0	〃	〃	5.7		5.0	〃	〃	0.8
2	5.0	15.0	3.0	0.0	7	4.0	10.0	1.0	0.0	12	6.0	〃	〃	1.7
	6.0	〃	〃	0.4		5.0	〃	〃	1.4		7.0	〃	〃	1.1
	7.0	〃	〃	8.2		6.0	〃	〃	3.5		6.0	7.5	3.0	1.1
3	6.0	15.0	5.0	1.0	8	7.0	〃	〃	9.4	13	7.0	〃	〃	2.9
	7.0	〃	〃	2.9		5.0	10.0	3.0	0.8		8.0	〃	〃	2.0
	8.0	〃	〃	3.8		6.0	〃	〃	2.5		7.0	7.5	5.0	0.0
	9.0	〃	〃	13.0		7.0	〃	〃	3.3		8.0	〃	〃	0.3
4	4.0	12.5	1.0	0.0	9	8.0	〃	〃	7.5	14	9.0	〃	〃	1.4
	5.0	〃	〃	0.0		6.0	10.0	4.0	0.0		3.0	5.0	1.0	0.0
	6.0	〃	〃	2.7		7.0	〃	〃	1.8		4.0	〃	〃	0.0
	7.0	〃	〃	7.2		8.0	〃	〃	3.1		5.0	〃	〃	0.0
5	6.0	12.5	3.0	0.2	10	9.0	〃	〃	5.8	15	6.0	〃	〃	0.6
	7.0	〃	〃	3.1		7.0	10.0	5.0	0.2		4.0	5.0	3.0	0.0
	8.0	〃	〃	7.4		8.0	〃	〃	1.7		5.0	〃	〃	0.0
						9.0	〃	〃	0.8		6.0	〃	〃	0.0

ブロック個数を差し引いたもの

③ 実験終了条件

沖波波高 H_0' を順次上昇させた時に、

- ①ブロック全体の被害率が5%以上になった場合
- ②ブロック全体の被害率が5%を越える前に被害率が低下した場合
- ③ブロック全体の被害率が5%を越える前に沖での碎波により人工リーフ前面での波高が低下した場合

にその断面における実験を終了するものとする。

2.2 実験結果

実験結果を表-1に示す。実験を行った断面条件は表に示す15ケースである。この中で、 $h=15$ mと12.5 mの各3ケースと $h=10$ m, $R=1, 3, 4$ mの3ケースの計9ケースで被害率が5%以上となった。

これらの結果より、同じ h の断面では R が深い程大きな H_0' で被害率が5%を越しており、被害が発生しにくくなるのが分かる。また、同じ R の断面では h が浅い程被害は発生しにくい。即ち、 h が浅く R が深い断面条件の方が被害が発生しにくくなる傾向のあることが明らかである。

又、 R が浅い場合の被害は法肩に集中するが、 R が深くなると被害が天端岸側の方に広がるようになることが分かった。法肩でのブロックは、水平方向の流れにより岸沖方向に移動・転倒するが、天端岸側では碎波による

上下方向の流れで上方へ脱落することが多くなり、ブロック設置場所により被害状況が変化することが明らかとなった。

2.3 考 察

(a) 所要重量算定方法

人工リーフの設計では、断面条件の他に人工リーフ被覆材の所要重量を算定する必要がある。ここでは以下に示す建設省土木研究所の人工リーフ被覆材所用重量算定式を用いる場合を考える。

$$W=K_L \frac{\rho_s(R+\bar{\eta}_t)^3}{s^3 \cos^3 \phi} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_L=S_n^3 f_u^6 K_V \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 W :被覆材所要重量、 ρ_s :被覆材の密度、 ρ_w :海水の密度、 s :被覆材の水中重量($=(\rho_s-\rho_w)/\rho_w$)、 ϕ :堤体表面上の最大流速発生地点の堤体表面と水平面のなす角、 $\bar{\eta}_t$:人工リーフ岸側での平均水位、 f_u :堤体表面の最大流速の無次元係数、 K_V :被覆材形状に関する係数、 S_n :安定係数である。この式を使用する場合、ブロック毎に K_V と S_n の値を決定する必要がある。 K_V は次式で定義される(宇多ら, 1990)。

$$V=K_V d_R^3 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V :ブロック体積、 d_R :ブロック代表長さである。 d_R はここでは次のように定義する。

$$d_R^3=LBH \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L :ブロック長、 B :ブロック幅、 H :ブロック

表-2 最適 S_n 値

No.	h (m)	R (m)	最適 S_n 値
1	15.0	1.0	0.41
2	15.0	3.0	0.37
3	15.0	5.0	0.59
4	12.5	1.0	0.33
5	12.5	3.0	0.46
6	12.5	5.0	0.80
7	10.0	1.0	0.38
8	10.0	3.0	0.71
9	10.0	4.0	0.96

高である。式(3)、(4)より、 K_v は次式で求まる。

$$K_v = V/(LBH) \dots \dots \dots (5)$$

図-1に示したブロックに式(5)を用いると、 $K_v = 0.664$ となることより、 $K_v = 0.7$ とする。

K_v が求まると、ブロック重量 W は既知のため、式(1)より H_0' 毎の S_n が次式で求められる。

$$S_n = \left(\frac{W}{f_v^6 K_v} \frac{s^3 \cos^3 \phi}{\rho_s (R + \bar{\eta}_t)^3} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (6)$$

S_n 値は R と h のみに依存するものとして、各断面において実験を行った H_0' の範囲で、

- ① 被害率が5%を越えた H_0' での S_n 値が最小の場合、それより1m低い H_0' での S_n 値
- ② 被害率が5%を越えた H_0' での S_n 値より小さい値がある場合、即ち S_n の極小値が存在する場合、その極小値以外での最小 S_n 値

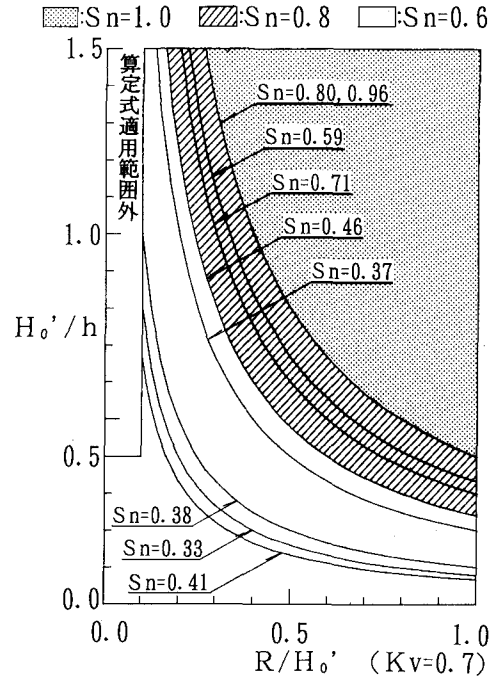
をその断面での最適 S_n 値とする。被害率が5%を越えたケースについての最適 S_n 値を表-2に示す。図-3に示すように、横軸に R/H_0' 、縦軸に H_0'/h をとって整理すると、多少のばらつきはあるものの、 R/H_0' と H_0'/h が共に大きくなるほど最適 S_n 値が大きくなる傾向のあることが分かる。このことと安全性を考慮すると、 S_n 値は人工リーフ断面条件により、図-3に示す $S_n = 0.6, 0.8, 1.0$ の3種類の中から選ぶことが妥当と考えられる。

(b) 砕波状況と被害状況

目視観測によると、ブロック設置場所による被害状況の変化は、入射波の砕波状況とそれに伴う水の流れと対応のあることが分かった。ブロックに被害を及ぼすような動揺を与える入射波には、次に示す2種類がある。

- ① 法肩により砕波を起こし、巻き波となるもの
- ② 法先から法面にかけて砕波を起こし、砕け寄せ波となるもの

波①においては、法肩ではほぼ水平の流れにより、ブロックには岸沖方向への移動・転倒が起こり、天端岸側では砕波による巻いた流れと衝撃が加わり、上方向への

図-3 安定係数 S_n 値算定図

ブロックの脱落が起こる。波②においては、法肩と天端岸側ともに砕波後の複雑な流れとなるが、法肩では法面沿いのやや上向きの流れが卓越する。波②では波①と比較して被害発生は少なく、法肩に移動・転倒が発生することはあっても、天端岸側での脱落はあまり見られない。

以上より、被覆ブロックにとっては岸沖方向に最も流れを受ける法肩が最も危険な設置場所である。また、一般的には天端では岸側ほど安全であるが、砕波形態によっては天端岸側でも上下方向の流れにより被害が発生する。故に、法肩や天端岸側に関わらず、被覆ブロックには法肩で巻き波砕波となる入射波が最も危険である。

3. 波力実験

3.1 実験内容

安定実験での目視観測により判明したブロック位置、砕波形態と被害状況の関連を具体的に調べるために、ブロックに加わる波力とブロック表面の流速を測定することとした。

波力と流速を測定するブロックは、法肩部として天端法肩(位置①)のものと、天端岸側部として法肩から35m(現地換算)岸側地点(位置②)のものを選り、ブロック位置による違いを測定する。

断面条件としては、 R が砕波形態に大きく影響を与えることから、 $h = 10$ mにおいて、 R の浅い場合として $R = 1$ m(ケース1)、深い場合として $R = 4$ m(ケース2)

の2ケースを選んだ。各々の断面では、被害率が5%を越えた時の H_0' (ケース1では $H_0'=7\text{ m}$, ケース2では $H_0'=9\text{ m}$) を用いるものとする。砕波形態は前述のように2種類あるので、実験波の中から巻き波と砕け寄せ波でブロックに動揺を与えるものを目視により各々選り出した。ケース1では実験開始から2分51秒後に人口リーフに入射する波を波①(巻き波), 4分43秒後のものを波②(砕け寄せ波)とし, ケース2では1分43秒後の入射波を波①(巻き波), 2分51秒後のものを波②(砕け寄せ波)とする。

各々のケースでの測定位置において, 各入射波によりブロックに加わる波力を3分計で計測するとともに, ブロック表面での流速を2次元電磁流速計で計測した。

3.2 実験結果

各波でのブロックに加わる水平方向力 F_x , 鉛直方向力 F_z の最大値を表-3に示す。水平方向では岸向きが正, 鉛直方向では下向きが正である。表よりどのケースに置いても, ブロックには岸向きと上向きの最大波力が加わっており, ブロックが岸側へ移動・転倒あるいは上方へ脱落することと一致する。 F_x と F_z の比はブロック位置と天端水深によりほぼ一定であり, 砕波形態の影響は小さい。 $R=4\text{ m}$ の天端岸側が0.33~0.45で最も大きく, 次は $R=1\text{ m}$ の法肩の0.24~0.31であり, 残りのケースは0.16~0.20の範囲にある。 F_x と F_z の値を見ると, 全ケースを通して巻き波の方が砕け寄せ波より大きくなっていることから, ブロック被害を問題にする時には, 巻き波砕波に注目すれば良い事が改めて分かる。

次に法肩と天端岸側を比べてみると, 法肩の方が大きな波力が加わっており, ブロック位置としては法肩の方が危険である。ここで, 法肩と天端岸側のブロックに加わる波力と水の動きを見るために, 両者の違いが明確である $R=4\text{ m}$ の場合の F_x , F_z と水平方向流速 V_x , 鉛直方向流速 V_z の時系列データを図-4に示す。流速の正負は波力と同じ向きである。図より, 両位置ともに水平方

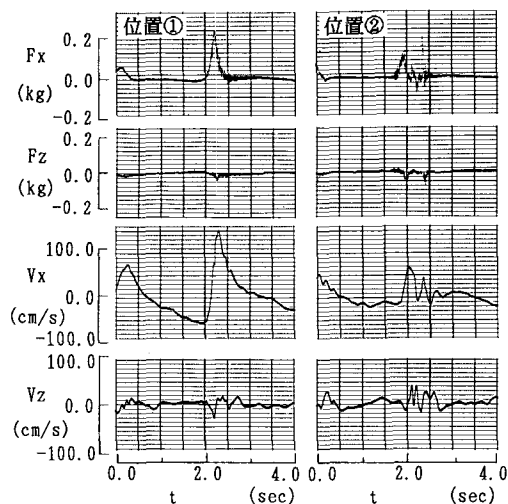


図-4 波力実験時系列データ ($R=4\text{ m}$, 巻き波砕波)

向の波力と流速, 鉛直方向の波力と流速がほぼ対応しており, 波力と流れの関係が明らかである。法肩ではほぼ水平方向の流れを受けるため単純な波形であるのに対し, 巻き波砕波後の流れを受ける天端岸側では, 岸沖と上下の両方向に細かい振動が発生しており, 力の向きが短時間で変化していることが分かる。

3.3 考 察

ブロックに加わる力を抗力と慣性力に分けて考えると, ブロックが法肩で移動・転倒する場合は水平方向の流れによる抗力が卓越し, 天端岸側で脱落する場合は砕波による上下方向の慣性力が卓越しているものと考えられる。

ここでブロック形状について考えると, 水平方向の抗力に対するには, ブロック重心の低下, 投影面積の減少, 接地面増加による摩擦増大等が必要になると思われる。鉛直方向の慣性力に対するには, 水の鉛直方向の動きを妨げない構造やブロック同士の噛み合わせ等の検討も必要となる。この他にも, 現場における施工性や経済性等の様々な条件を考慮することも必要である。

被覆ブロックに求められるこのような条件の中には, お互いに矛盾したものもあるため, ブロック形状や被覆方法を検討する場合, 満たすべき条件をある程度絞り込む必要があると思われる。

4. ま と め

以上より主な結論をまとめると次のようになる。

① 図-1に示すブロックに関して, 建設省土木研究所の人工リーフ被覆材所要重量算定式を用いる場合, 形状係数 K_v と安定係数 S_n は図-3に示したものを採用するのが妥当である。

表-3 波力実験結果

No.	ブロック位置	対象波	F_x 最大値 (kg)	F_z 最大値 (kg)	$\left \frac{F_z}{F_x} \right $
1	①	①	0.21	-0.05	0.24
		②	0.13	-0.04	0.31
	②	①	0.19	-0.03	0.16
		②	0.05	-0.01	0.20
2	①	①	0.24	-0.04	0.17
		②	0.11	-0.02	0.18
	②	①	0.11	-0.05	0.45
		②	0.06	-0.02	0.33

② 被覆ブロックの被害は主に法肩であるが、天端水深 R が深くなると天端岸側へと被害範囲は広がる傾向がある。

③ 被覆ブロックにとっては、法肩で巻き波砕波となる入射波が被害発生に大きく影響する。

④ ブロックの被害は、法肩では沖から岸への移動・転倒となるが、天端岸側では砕波による振動により上方への脱落が多くなる。

参 考 文 献

- 浅川 勉・佐藤弘和・口ノ町誠・野口正昭 (1992): 人工リーフ被覆材の安定性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 656-660.
- 泉宮尊司・遠藤雅人 (1992): 潜堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 638-642.
- 岩田好一朗・水谷法美・Teofilo Monge Rufin Jr.・戸塚奈津子・倉田克彦 (1992): 作用波力を考慮した幅広潜堤の被覆材の所要重量算定手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 661-665.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友伸 (1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定方法, 土木研究所資料, 第 2893 号, 48 p.
- 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 646-650.
- 建設省河川局海岸課監修 (1992): 人工リーフの設計の手引き, (社)全国海岸協会, 94 p.