

透過式消波構造物の波力特性に関する実験的研究

国栖 広志*・近藤 浩右**・清水 正已***

宇多 高明****・村井 禎美*****

1. まえがき

海域の高度利用を目的に、外洋に面した沖合に透過式消波構造物を設置して海岸域の侵食防止を図り、かつ背後域に広い静穏海域を確保して海洋性レクリエーションなど多目的に利用しようとの要請が高まりつつある。しかし、外洋に面する砕波域に設置した透過式消波構造物に関する研究は少なく、このような条件下での水理特性の把握は構造物の設計上重要な課題である。そこで、宇多ら(1987a, 1987b, 1988)、国栖ら(1987, 1988)、近藤ら(1988)は消波性能、漂砂特性と局所洗掘、および1/10海底勾配における波力特性について水理模型実験を行い、これらの特性について明らかにしてきた。

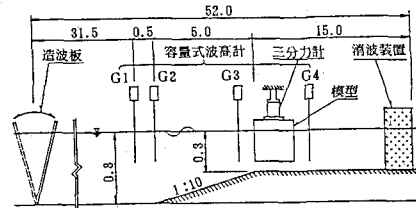
本研究は、これにひき続き海底勾配が比較的緩い1/50勾配の波力実験を実施し、構造物諸元に対する特性を検討するとともに、1/10勾配の実験結果も併せて検討し、透過式消波構造物の波力算定方法と衝撃性波力の発生条件について検討した。

2. 実験方法

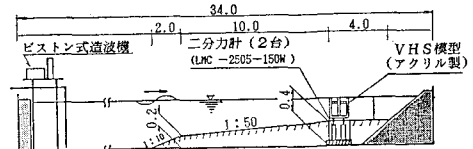
海底勾配の違いによる波力特性を検討する目的で図-1に示す水路に1/10、1/50勾配斜面を設置して実験を行った。実験に用いた模型構造物は、3枚の透過鉛直壁と水面付近の透過水平板ならびに不透過な底板から構成される。

構造物は、1/10勾配で用いた鉛直壁空隙率0.26、透過水平板空隙率0.15、天端高水深比 $h_1/h=0.0$ 、透過水平板没水深比 $R/h=0.1$ 、鉛直壁角度 0° を基本型とし、この時の消波性能は透過率約0.6以下、反射率0.4以下である。1/50勾配における波力特性は模型を表-1に示す諸元に変化させて検討した。全波力の測定は1/10勾配では3分力計、1/50では2分力計を用いた。部材波圧はスリット部材を片持ちバリとして、図-2に示す位置にヒ

ズミゲージを設置して測定した。不透過底板の波圧は両面に小型波圧計を設置して差圧から求めた。堤体の直前と直後には容量式波高計を設置して、サンプリング間隔0.002秒(1/10勾配)または、0.005秒(1/50)で波圧を含めた全チャンネル同時に計測を行った。波力は約10波の平均から水平力および揚圧力を $f_x=F_x/A_H$, $f_z=F_z/A_V$ から算定した。ここに、 F_x , F_z は分力計で計測した波力、 A_v , A_H は鉛直および水平方向の投影面積である。



1) 1/10 勾配斜面



2) 1/50 勾配斜面

図-1 実験水路

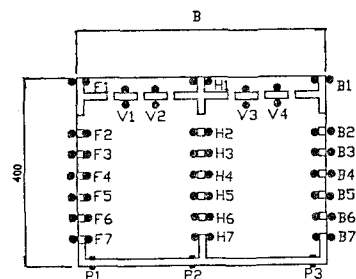


図-2 部材波圧測定点

* 正会員 五洋建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術部 技術企画課

*** 正会員 工修 大成建設(株) 設計部

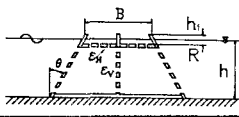
**** 正会員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室長

***** 正会員 工修 建設省土木研究所 海岸研究室

表—1 実験及び水路諸元

	1/10 勾配斜面				1/50 勾配斜面			
想定箱尺 堤体設置水深 h (cm)	1/33 27.0 30.0				1/25 38.0 40.0 44.0			
周期 波高	T (s) H (cm)	1.6 15.6	2.0 23.4	2.4 26.0	1.6 18.0	2.0 25.0	2.4 30.0	2.8 30.0
		31.2	33.8	36.4	34.0	38.0		
天端高 鉛直壁開口率 鉛直壁角度 水平板開口率 水平板浸水深 堤体幅	h_1 (cm) ε_v (度) ε_H R (cm) B (cm)	0.0 0.26 0 0.16 -3.0 30.0	3.0 0.26 0 0.16 -3.0 30.0	4.0 0.26 0 0.16 -3.0 30.0	-4.0 0.15 0 0.10 -8.0 40.0	0.0 0.25 15 0.15 -4.0 50.0	4.0 0.35 45 0.30 0.0 80.0	
水路諸元	長さ52m、幅0.6m 高さ1.2m				長さ32m、幅5m、高さ1.2m (水路幅を0.6mに仕切る)			

模型諸元の記号



3. 実験結果と考察

3.1 全波力

1/10, 1/50勾配における基本型的全波力は波浪および構造物の諸元に対して式(1)に示す主要パラメータを選定して検討した。ただし、構造物のパラメータは1/50勾配のみ検討を行った。

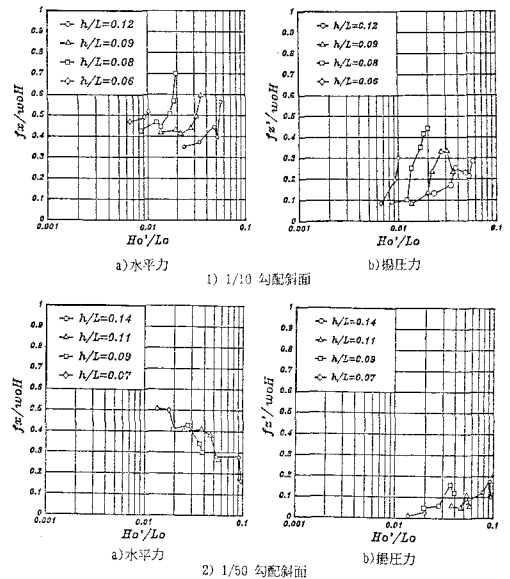
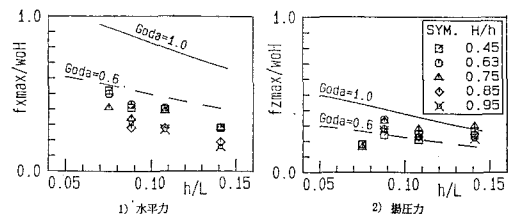
$$f/w_0 H = f\{H_0'/L_0, i, H/h, h/L, \varepsilon_v, \varepsilon_H, h_1/L, \theta, R/h\} \quad (1)$$

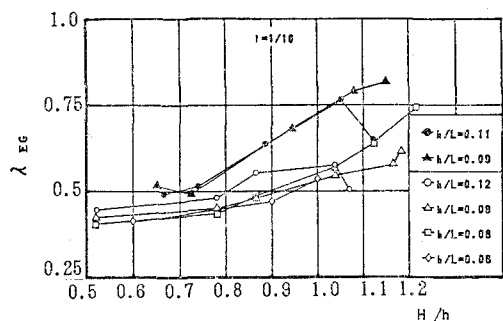
ここに、 f : 構造物に働く平均波圧強度, w_0 : 水の単位体積重量, H : 通過波高, H_0'/L_0 : 換算沖波波形勾配, i : 海底勾配, h : 水深, その他 $\varepsilon_0 \sim R$ の記号は表—1に示す。

水平力および揚圧力と H_0'/L_0 の関係を図—3に示す。1/10勾配斜面の水平力および揚圧力は H_0'/L_0 の増大とともにある値から急激に大きくなる。この傾向は相対水深 h/L が小さい波ほど H_0'/L_0 の小さい条件でも発生する。一方、1/50勾配斜面では、水平力は H_0'/L_0 の増大とともに減少し、揚圧力は H_0'/L_0 の増大とともに増加傾向にあるが1/10勾配と比較すると増加率は小さい。以上より、衝撃性波力の発生条件は海底勾配と換算沖波波形勾配に対して密接な関連性のあることがわかる。このことは、日本港湾協会編(1989)で示す直立不透過壁の衝撃碎波力が、海底勾配が1/30程度より急で、直立壁のやや沖側で碎波し、かつその換算沖波波形勾配が0.03程度以下のときに生じる条件とはほぼ一致する。

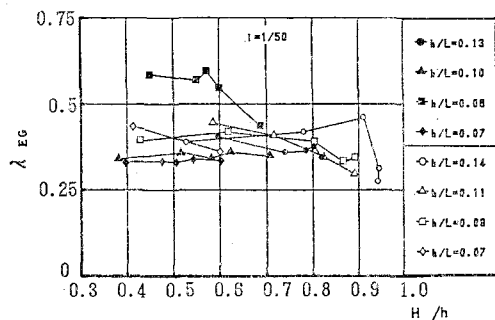
波力と相対水深 h/L の関係を図—4に示す。実線および点線は合田式を準用した場合の波力の低減係数が0.6と1.0の計算結果である。水平力は h/L の増大とともに減少し、低減係数は0.6以下となるが合田式の傾向とはほぼ一致する。揚圧力は h/L の増大に対して合田式から多少外れる。これは、本構造物が水面付近に透過

水平板を有するため、水面上昇時に揚圧力の発生することが原因である。しかし、他の実験ケースにおいても波力は図—4と同様の傾向を示すことから、透過式構造物においても波力の低減係数を決めることにより合田式を準用することができるものと考えられる。そこで、実験から求めた滑動合成波力 $(f_{x\max} + \mu f_z)_E$ と合田式において計算される滑動合成波力 $(f_{x\max} + \mu f_z)_G$ との比を低減係数とする。このとき、 λ_{EG} と波高水深比 H/h の関係を図—5に示す。図には天端高水深比 $h_1/h = 0.0$ と0.11の結果を示す。本式で用いた揚圧力は水平力最大時における同時波力である。1/10勾配斜面において H/h が0.8以下では λ_{EG} の変化は比較的ゆるやかであるが、0.8以上では急激に増加する。一方、1/50勾配斜面では H/h の変化に対して λ_{EG} はほぼ一定である。また、1/10勾配において構造物天端が水面より突出した方が λ_{EG} は大きく1/50勾配においては両者の顕著な差は認められない。次に、碎波形式の指標である Battjes(1974)らの示した Surf similarity parameter $I_r = i/(H_0'/L_0)^{1/2}$ を用いて λ_{EG} を整理したのが図—6である。図の斜線部は λ_{EG} が0.7以上 ($0.4 < I_r < 0.8$, $H/h > 0.9$) の領域

図—3 水平力、揚圧力と H_0'/L_0 の関係図—4 波力と h/L の関係



1) 1/10 勾配斜面



2) 1/50 勾配斜面

図-5 λ_{EG} と H/h の関係

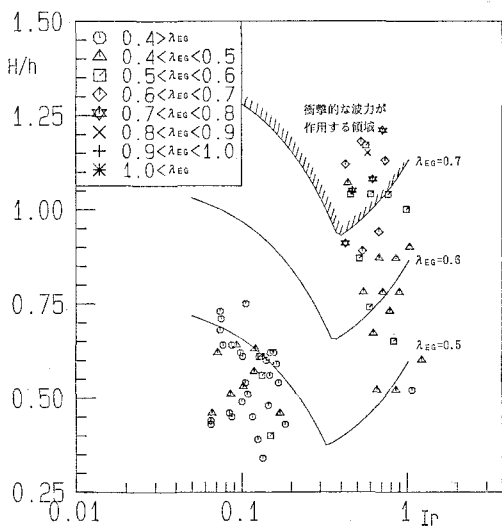


図-6 $H/h-I_r-\lambda_{EG}$ の関係

を示し、透過式構造物において衝撃性波力の発生する可能性のある領域である。前述の直立壁において衝撃性波力の発生が $1/10 \sim 1/30$ 勾配で換算沖波波形勾配 $H/L_0 = 0.01 \sim 0.03$ 程度の範囲と想定すると I_r は $0.2 \sim 1.0$ となり、透過式構造物の場合この範囲とはほぼ一致する。ただし、この領域内において透過式構造物の λ_{EG} は $0.5 \sim 0.6$ 程度のものも含まれ、堤体設置地点と碎波点の位置関係によってはかなりの変動幅がある。図中の実線は

式 (2) に示す $1/50(\lambda_1)$, $1/10(\lambda_2)$ 勾配での λ_{EG} に対して多変量解析により求めた実験式である。

$$\lambda_{EG} = \max\{\lambda_1, \lambda_2\}$$

$$\lambda_1 = 0.25 + 0.32(H/h) + 0.40 I_r$$

$$\lambda_2 = 0.40 + 0.37(H/h) - 0.12 I_r \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 λ_{EG} : 基本型の合田式に対する波力低減係数

H : 設置地点での最高波高

h : 設置水深

I_r : Surf similarity parameter

$$(i/(H_0'/L_0)^{1/2})$$

実験式と実験値の適合性を比較したのが図-7である。両勾配とも λ_{EG} はかなりのバラツキは見られるものの実験式は実験値をほぼ包絡している様子が分かる。

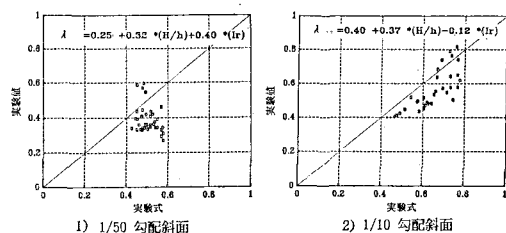


図-7 実験式の適合性

3.2 λ_{EG} の補正

1/50勾配斜面の基本型に対して鉛直壁空隙率 ε_v 、頂版空隙率 ε_H 、頂版没水深 R 、天端高 h_c 、堤体幅 B 、鉛直壁角度 θ の緒元が変化したときの λ_{EG} の補正係数の算定法について検討する。

a) 鉛直壁空隙率 ε_v

鉛直壁空隙率 ε_v が変化した場合の λ_{EG} の特性の一例 ($h/L = 0.088$, $i = 1/50$) を図-8に示す。図より空隙率が増大すると波力の低減率はほぼ直線的に減少する。これを全データを用いて基本型 ($\varepsilon_v = 0.25$) に対する補正係数 K_1 は式 (3) となる。

$$K_1 = -\varepsilon_v + 1.26 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、適用範囲は $(0.15 < \varepsilon_v < 0.35)$ である。

b) 頂版空隙率 ε_H

頂版空隙率 ε_H の変化は主として揚圧力に影響を与える。そこで、揚圧力について整理すると図-9に示すように ε_H の小さい方が揚圧力大きい。しかし、 λ_{EG} で整理すると図-10に示すように ε_H が 0.15 で極小値を示し揚圧力のみで整理した特性と異なる。波力の時刻歴図を検討すると、最大水平力と最大揚圧力の発生時刻の位相は頂版の空隙率によって変化し、 ε_H が 0.15 のとき最も位相差が大きい。このため最大水平力発生時刻における揚圧力を用いて整理した λ_{EG} の値は 0.15 のときに最も小さくなる。以上より、全データについて頂版空隙率 ε_H の補正係数 K_2 を示すと式 (4) となる。

$$K_2 = 20.0(\varepsilon_H)^2 - 7.5\varepsilon_H + 1.67 \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし、適用範囲は $(0.1 \leq \varepsilon_H \leq 0.3)$ である。

c) 堤体幅 B

水深波長比 h/L が 0.08 のときの堤体幅に対する λ_{EG} の実験結果を図-11に示す。堤体幅に対しても、最大水平力と最大揚圧力の発生する位相がずれるため $B/h = 1.25$ のときに極小値を示す。補正係数 K_3 を全データについて整理すると式 (5) となる。

$$K_3 = 1.57(B/h)^2 + 4.00(B/h) + 3.55 \quad \cdots \cdots (5)$$

ただし、適用範囲は $(1.0 \leq B/h \leq 1.5)$ である。

d) 天端高 h_c

天端高の効果は $h_c/h = -0.1 \sim 0.1$ と比較的小さな変動で検討した。波力は図-12に示すように没水した場合に最も小さく、天端が高くなるに従って直線的に増大する。このときの基本型に対する補正係数 K_4 は式 (6) となる。

$$K_4 = 1.8(h_c/h) + 1.0 \quad \cdots \cdots (6)$$

ただし、適用範囲は $(-0.1 \leq h_c/h \leq 0.1)$ である。

e) 頂版没水深 R/h

頂版没水深比 R/h が 0.1 と 0.2 の場合に対する補正係数 K_5 の結果を図-13に示す。頂版没水深の深い方が波力は大きい。波力の時刻歴図から、没水深が小さいときの最大揚圧力は最大水平力より早く発生し、没水深が大きい場合は揚圧力と水平力の最大値がほぼ同時に作用する。この位相差により、波圧合力値は没水深の深い方が大きい。頂版没水深 R/h の補正係数について整理する

と式 (7) となる。

$$K_5 = 2.0(R/h) + 0.8 \quad \cdots \cdots (7)$$

ただし、適用範囲は $(0.1 \leq R/h \leq 0.2)$ である。

f) 堤体前面傾斜角度 θ

堤体前面傾斜角度が 0° , 15° , 45° の結果を図-14に示す。波力は 0° に比べて 15° の場合に増加し、 45° では減少する。 15° で波力が増加する原因は、波力の測定結果から揚圧力は 0° , 15° とほぼ同じ大きさであるのに対して、水平力は 15° の方が約 1 割程度大きくなるためである。水平力は 0° , 45° でほぼ同じであるが、 45° では揚圧力の減少が顕著である。これは斜面に作用する波力が鉛直下向きに作用し底板の揚圧力と相殺するためである。全データに対する基本型を 1.0 としたときの補正係数 K_6 は式 (8) となる。

$$K_6 = -0.0003\theta^2 + 0.011\theta + 1.0 \quad \cdots \cdots (8)$$

ただし、適用範囲は $(0 < \theta < 45)$ である。

以上より本構造物の合田波圧式に対する波力の低減係数 λ は、基本型の λ_{EG} と構造物の補正係数を用いて式 (9) で求めることができる。

$$\lambda = \lambda_{EG} K_i \quad (i=1 \sim 6) \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし、適用範囲は $(0.06 < L_r < 0.2)$ であることに注意する必要がある。

3.3 部材波圧

著者ら(1988)は前報において1/10勾配の部材波圧は、前面鉛直壁最前列の上段部3枚 ($F1$, $F2$, $F3$) および中間高最上段の部材 ($H1$) と、前室透過水平板の2枚の

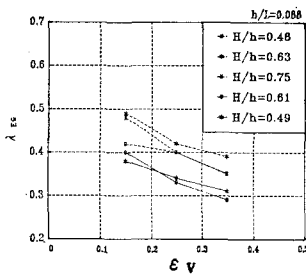


図-8 ε_v と λ_{EG} の関係

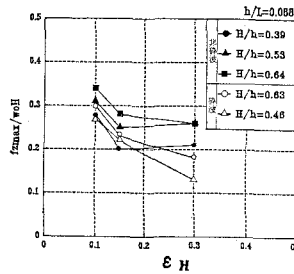


図-9 ε_H と揚圧力の関係

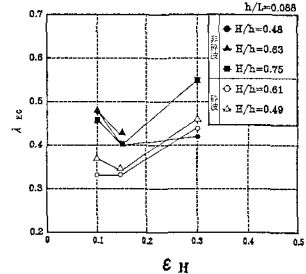


図-10 ε_H と λ_{EG} の関係

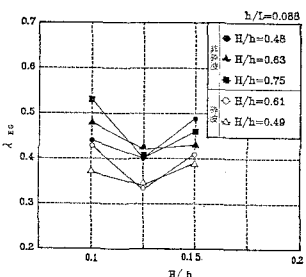


図-11 堤体幅と λ_{EG} の関係

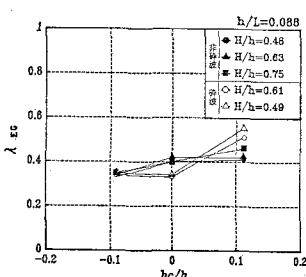


図-12 天端高と λ_{EG} の関係

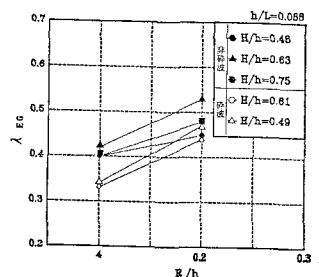
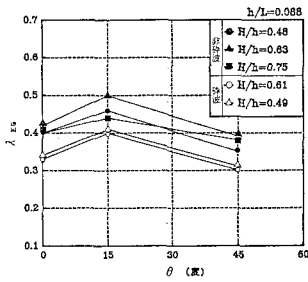


図-13 頂版没水深と λ_{EG} の関係


 図-14 θ と λ_{EG} の関係

部材 (V1, V2) には $0.8 \sim 1.0 w_0$ 程度の波力が作用することを示した。そこで今回は $1/50$ 勾配における部材波圧特性について検討した。基本型における部材波圧は図-15に示すように最上段の部材 (F1, H1, B1) で約 $0.8 w_0 H$ の比較的強い波力が作用するものの、2段目以降の没水したスリット壁には $0.3 w_0$ 程度しか作用しない。また、透過式水平板についても $0.4 w_0 H$ 程度の波圧であり、 $1/10$ 勾配の波圧に対して著しく小さくなる。底版に $0.3 w_0 H$ 程度の波圧が作用するがその位相は水平力の位相と 180° ずれ水平力最大時には押込力として作用する。一方、 $h_1/h = 0.11$ と構造物天端が水面より突出した場合には最上段のスリット壁および透過式水平板で基本型に対して波力係数が増加するがその他の部材においては基本型とほぼ同じである。

4. ま と め

水理実験結果より透過式消波構造物の波力特性をまとめると以下のとおりである。

1. 透過式消波構造物の基本型に対して、合田波圧式に対する波力の低減係数は Surf similarity parameter I_r と波高水深比 H/h から式 (9) より算定することができる。

2. $1/50$ 勾配基本型に対して、鉛直壁空隙率 ϵ_v 、頂版空隙率 ϵ_H 、頂版没水深 R 、天端高 h_c 、堤体幅 B 、鉛直壁角度 θ を変更した場合の波力の補正係数は、式 (3)～式 (8) を用いて算定することができる。

3. 部材波圧は鉛直壁最上段のスリットに $0.8 \sim 1.0$

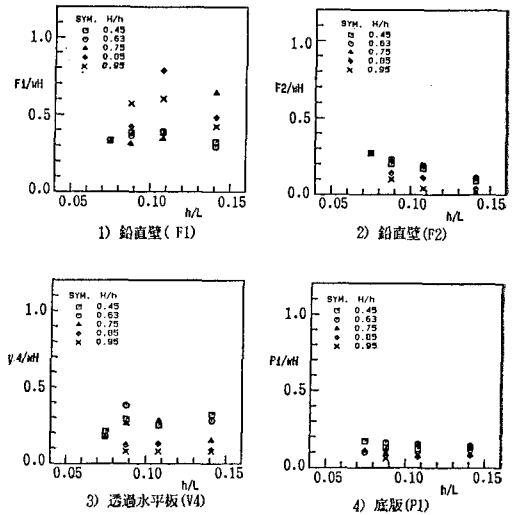


図-15 部材波圧 (基本型)

$w_0 H$ 程度作用し、その他の鉛直部材は $0.3 w_0 H$ 程度である。また、透過式水平板については $0.4 w_0 H$ 程度である。

参 考 文 献

- 宇多高明他 (1987a): 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (1), 土木研究所資料, 第 2454 号, 173 p.
- 宇多高明他 (1987b): 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (3), 第 1 グループ F.S. 調査報告書 土木技術研究所資料, 第 2511 号, 168 p.
- 宇多高明他 (1988): 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (5), 一皆生海岸 F.S. 調査報告書 土木技術研究所資料, 第 2609 号, 285 p.
- 国栖広志・福山博信・宇多高明・村井禎美 (1987): 透過式水平板付スリット堤の消波特性, 第 42 回年次学術講演会概要集 (II) pp. 550～551.
- 国栖広志・山崎 剛・福山博信・勝井秀博・小山文雄 (1988): 急勾配斜面に設置した低天端透過堤の波力特性, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 667～671.
- 近藤浩右・福山博信・国栖広志・小山文雄・中塚健司 (1988): 透過式消波構造物の漂砂制御機能に関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 417～421.
- 日本港湾協会編 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版 (上巻) pp. 126.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 466～480.