

浮消波堤の3次元水槽における消波性能について

高木 儀昌*・森口 朗彦**・明田 定満***・滑川 順****

1. ま え が き

近年、増養殖場の整備や海洋リクリエーション基地の造成等、静穏域創出の要請が高まってきている。通常、静穏域造成の方法としては重力式消波堤の使用が大多数であるが、水質環境保全の面や対象水域が次第に大水深域に展開されていることから、海水交換を妨げず水質の保全がし易いこと、設置水深が深くなるにつれ経済的優位性を持つこと等の面から浮消波堤の採用が計画・検討されてきている。また、周期の長い外洋性波浪に適応可能な従来の消波方式とは異なる形式の浮消波堤も開発されてきている。しかしながら、浮消波堤の性能や効果の評価検討は、2次元モデルでの性能や重力式透過堤群と同様にみなして行われることが多く、また、浮消波堤は係留索によって複数の消波浮体を平面的に配置するものであり、現実の入射波も周辺地形の影響等で必ずしも堤体に直入射とはならず、このような条件の基での消波性能は必ずしも明確とはなっていない。更に、堤体間開口部からの侵入波についても堤体端部の形状や堤体相互運動の侵入波に及ぼす影響等、浮消波堤計画策定における性能や効果の評価の方法が明確となっていないのが現状である。本研究は水槽模型実験により、各種消波方式の浮消波堤での3次元平面配置状態や斜入射波時の消波性能、堤体間開口部の消波効果に及ぼす影響等を明らかにすると共に、各種形式浮消波堤の適用範囲を把握し、浮消波堤計画策定の際の消波性能・効果の評価方法の基礎資料を得ることを目的としたものである。

2. 実験内容

実験は想定縮尺1/64として、長さ40m、幅11m、深さ0.8mの平面水槽を使用し、水深30m相当の水平床部に浮消波堤模型を係留設置し透過波高分布の計測を行った。

使用した浮消波堤の模型は、消波対象波が波高=2m、周期=8s、構造設計対象波が波高=8m、周期=12s、設

置水深=30m、入射波向（浮消波堤法線の垂線と入射波のなす角） $=0\sim 30^\circ$ の設計条件の基で作成した、①箱形、②渦による攪乱型、③エネルギー吸収型、④内部水流振動型の4種であり、消波堤形式による消波特性の比較のため幅(B)23cm×長(L)=95cm×高さ(D)=16cmの同一寸法で堤体幅・吃水比(B/d)=1.6（非係留状態）とし、重心・メタセンター距離(GM)=16mmで統一した（図-1参照）。

係留配置は図-2に示す通りであり、堤体間隔は、 $1.0B=23\text{ cm}$ とし、係留索は横（岸沖方向）が39.5g/m、縦（斜め方向）19.1g/mの真鍮製のチェーンを使用した。

実験は各型式の浮消波堤について、平面配置での消波効果をみるための、①浮消波堤1基配置、直入射波（入射波向 $\theta=0^\circ$ ）、②3基配置、直入射（ $\theta=0^\circ$ ）、③3基配置、斜め入射（ $\theta=30^\circ$ ）の3種の配置条件での実験と浮消波堤堤端からの回折の影響を除き消波方式そのものに依存する消波性能を把握するための2次元水路実験を行った（図-3参照）。

実験波は規則波であり、平面実験では消波対象波相当

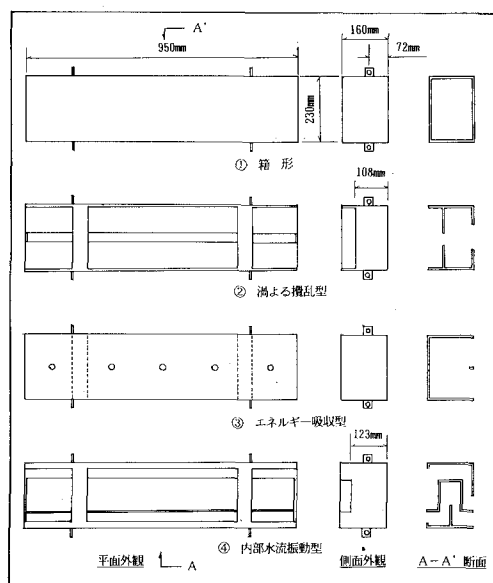


図-1 浮消波堤模型

* 正会員 工博 水産庁水産工学研究所
 ** 正会員 工修 水産庁水産工学研究所
 *** 正会員 北海道開発庁開発土木研究所
 **** 正会員 国際気象海洋技術部

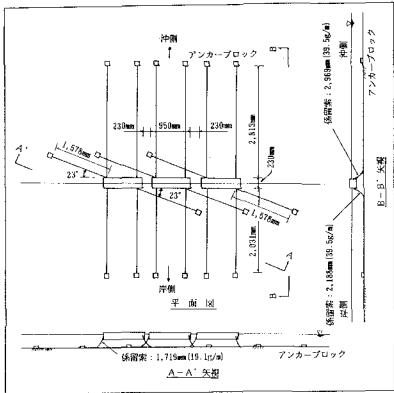


図-2 係留配置

表-1 実験波一覧表

波高	周期	深海波		計置位置	
		波長	λ/B	波長	λ/B
3.1cm /6.0cm	0.60s	56cm	2.4	56cm	2.4
	0.70s	76cm	3.3	76cm	3.3
	0.77s	92cm	4.0	92cm	4.0
	0.86s	115cm	5.0	114cm	5.0
	1.02s	162cm	7.0	155cm	6.7
	1.09s	185cm	8.0	174cm	7.6
	1.21s	228cm	9.9	204cm	8.9
	1.49s	346cm	15.0	274cm	11.9

表-2 実験ケース一覧表

実験種	ケース No.	浮消波堤構造	入射波向	設置函数
3次元 平面実験	1	箱型	0°	1
	2	箱型	0°	3
	3	箱型	30°	3
	4	渦による攪乱型	0°	3
	5	渦による攪乱型	0°	3
	6	渦による攪乱型	30°	3
	7	エネルギー吸収型	0°	1
	8	エネルギー吸収型	0°	3
	9	エネルギー吸収型	30°	3
	10	内部水流振動型	0°	3
2次元 水路実験	11	渦による攪乱型	—	—
	12	エネルギー吸収型	—	—
	13	内部水流振動型	—	—

の波高3.1cm（波高2mの1/64）で深海波での波長・堤体幅比（ λ/B ）が3.3～15.0の間となる周期の7種の波を設定した。2次元実験においては入射波高の違いによ

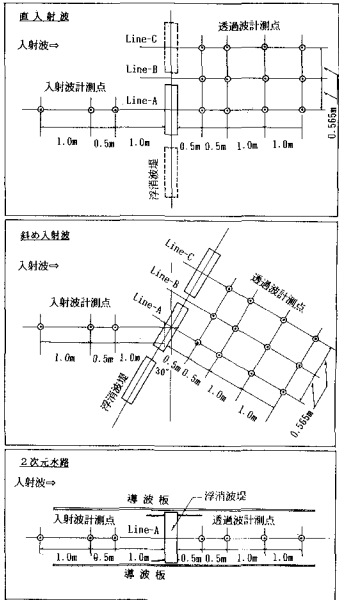


図-3 平面配置形状及び波高計測点

る消波性能の差異を見るために構造設計対象波の1/2程度の波高6.0cm（波高4mの1/64）の波を設定し、更に、 $\lambda/B=0.28$ となる周期を追加した（表-1参照）。実験ケースは表-2に示す通りである。

波高計測は容量式波高計を使用し、計測域の波浪場が定常に達した時から20msのサンプリング間隔で10s間のデータを収録した。計測位置は図-3に示す通りであり、入射波の計測点として中央堤体の中心線上の堤体沖側から沖に1.0m、1.5m、2.5mの3点（1.0m点を入射波の基準点とし、他の2点は補助）、透過波の計測点として消波堤の設置法線に垂直な中央堤体の中心線（Line-A）、堤体間の中央線（Line-B）及び端堤体の中心線（Line-C）の3測線上の堤体岸側端から岸に0.5m（約 $0.5 * L$ ：堤体長）、1.0m（ $1.0 * L$ ）、2.0m（ $2.0 * L$ ）、3.0m（ $3.0 * L$ ）の位置の格子点である。

計測結果は透過係数 C_t （消波堤末設置状態と設置状態での波高比）と消波堤設置水深での波長と堤体幅の比 λ/B について整理した。

3. 実験結果と考察

3.1 3次元平面での消波効果

浮消波堤背後域で透過係数 $C_t \leq 0.5$ 又は $C_t \leq 0.6$ が確保できるか否かを消波堤の効果（有効性）を判断する指標とし、表-3は3次元平面実験における浮消波堤背後域の透過係数 $C_t \leq 0.5$ 又は $C_t \leq 0.6$ となる計測点（これを有効領域と呼ぶ）を示したものであり、図-4は堤体背後1m域（0.5m、1mの2地点の平均）及び同3m域

(0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m の4地点の平均)の平均での $C_t \leq 0.5$ 又は $C_t \leq 0.6$ となる λ/B の範囲 (これを有効範囲

表-3 $C_t \leq 0.5$, $C_t \leq 0.6$ の計測点

ケース No	浮消波堤 構造	● : $C_t \leq 0.5$ ○ : $C_t \leq 0.6$														
		λ/B	3.3 (0.70s)				4.0 (0.77s)				5.0 (0.86s)					
		位置	0.5	1	2	3m	0.5	1	2	3m	0.5	1	2	3m		
(a) 3基設置・直入射波																
2	箱型	ラインA ラインB ラインC	● ● ●	● ● ●	 ● ●	 ○ ●	 ●	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ●
5	渦による 攪乱型	ラインA ラインB ラインC	● ● ●	● ○ ●	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○	○ ● ○
8	エネルギー 吸収型 乾舷1.0 H	ラインA ラインB ラインC	● ● ●	○ ● ●	 ● ●	 ● ●	 ● ●	 ● ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○
10	内部水渦 振動型	ラインA ラインB ラインC	 ● ○	● ● ○	● ○ ●	● ○ ●	● ○ ●	● ○ ●	● ○ ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
(b) 3基設置・斜め直入射波																
3	箱型	ラインA ラインB ラインC	 ●	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○	 ○
6	渦による 攪乱型	ラインA ラインB ラインC	● ● ●	○ ● ○	● ○ ●	○ ○ ○	 ● ●	 ● ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○
9	エネルギー 吸収型 乾舷1.0 H	ラインA ラインB ラインC	 ○	 ○	 ● ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○	 ○ ○

と呼ぶ) を示したものである。

a) 1基配置・直入射波 消波堤を1基設置し、これに直入射波を作用させた、浮消波堤の相互干渉の無い状態での消波効果をみた。

$C_t \leq 0.5$ が確保できる有効範囲 (λ/B の範囲) は堤体背後1m域の平均では3形式とも $\lambda/B \leq 4.5$ 程度であるが、背後3m域まで広げると箱形とエネルギー吸収型では $\lambda/B \leq 4.0$ と短波長側に移行し、渦による攪乱型では $\lambda/B = 4.0$ 付近の一部分のみとなる。 $C_t \leq 0.6$ では3方式とも、その有効領域、有効範囲にほとんど差がない(図-4(a)参照)。

b) 3基配置・直入射波 消波堤を3基設置し、実海域の設置状態に近い状態で直入射波を作用させた時に消波効果をみた。

$C_t \leq 0.5$ 及び $C_t \leq 0.6$ の有効領域(測定点)は、 $\lambda/B = 3.3$ の波において渦による攪乱型は全域で、内部水流振動型は1m以遠の全域で $C_t \leq 0.6$ となるが、箱形及びエネルギー吸収型は堤体間の測線 Line-B 上で堤体に近い域では $C_t \leq 0.6$ が確保されない。 λ/B が4.0, 5.0と波長が長くなると4形式とも有効領域は減少するが、渦による攪乱型と内部水流振動型では $\lambda/B = 5.0$ においても50%以上の測定点で $C_t \leq 0.6$ が確保されるのに対し箱形では25%, エネルギー吸収型では無しとその減少は大きい(表-3(a)参照)。 $C_t \leq 0.5$ 及び $C_t \leq 0.6$ が確保できる有効範囲 (λ/B の範囲) は渦による攪乱型と内部水流振動型では中央堤体の中心線 Line-A, 堤体間中心線 Line-B, 端堤体の中心線 Line-C の3測線ともみられるが、箱形とエネルギー吸収型では Line-B には出現しな

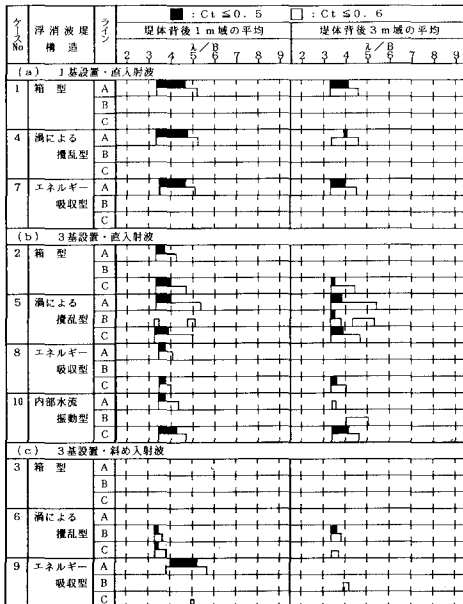


図-4 $C_t \leq 0.5$, $C_t \leq 0.6$ となる λ/B

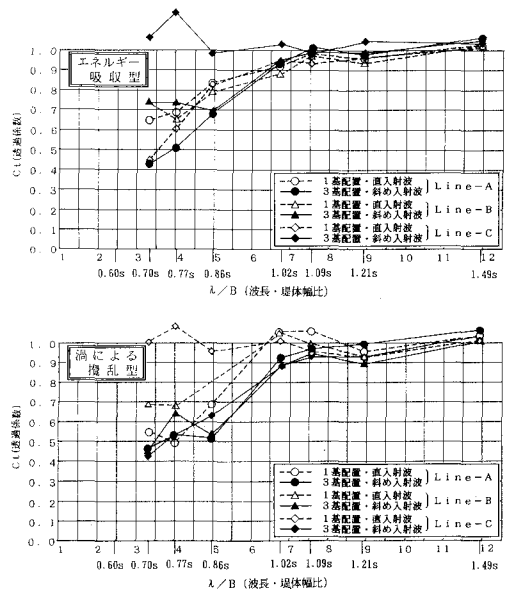


図-5 消波性能曲線 (2D)

い。また、対象領域を堤体背後1mから3mに広げた時の有効範囲の減少は渦による攪乱型と内部水流振動型は他の2形式に比べて小さい。堤体背後3m域の平均での $C_t \leq 0.5$ の有効範囲が最も広がった λ/B の上限は、箱形:3.5, 渦による攪乱型:3.8, エネルギー吸収型:3.6, 内部水流振動型:4.1である(図-4(b)参照)。

図-5は、エネルギー吸収型と渦による攪乱型について、平面に1基設置と3基設置した時の各測線での消波性能曲線($C_t - \lambda/B$)を示したものである。各測線は○: Line-A, △: Line-B, ◇: Line-Cで、1基配置は白抜き記号、3基配置は塗りつぶしで示してある。堤体間中央の測線: Line-Bをみると、堤端が壁状であるエネルギー吸収型においては1基設置と3基設置とも透過係数 C_t は ≥ 0.7 程度で余り変化が無い。一方、堤端部に遊水部が設けられている渦による攪乱型では、1基設置の場合の C_t は ≥ 0.7 程度であったのが3基設置においては堤体背後の2測線(Line-A, B)と差が無くなり、堤端部の処理の違いにより堤間からの回折(侵入)波の影響は大きく異なる。

このように、渦による攪乱型と内部水流振動型は箱形やエネルギー吸収型よりも長波長の波に対して消波効果が大きかったが、後述の斜め入射波及び2次元水路での結果と合わせて考えるとエネルギー吸収型については消波方式そのものの差異によるものよりも、堤端の処理(形状)の違い(エネルギー吸収型の端部は壁状であるのに対し、渦による攪乱型、内部水流振動型では遊水部となっている)による堤体間からの回折波の影響の差異によるものが大きい。

c) 3基配置・斜め入射波 b) 同様に消波堤を3基設置し、これに入射角 $\theta = 30^\circ$ の方向からの波を作用させて、斜め入射波時の消波性能をみた。

$C_t \leq 0.5$ 又は $C_t \leq 0.6$ が確保できる有効範囲(λ/B)は、箱形では $\lambda/B = 4.0$ 付近で $C_t \leq 0.6$ (堤体背後3m平均の Line-B)となるのみである。渦による攪乱型では Line-B と Line-C に $C_t \leq 0.5$ となる有効範囲がみられ、その範囲は $\lambda/B \leq 3.6$ (堤体背後3m域の平均で Line-B)である。エネルギー吸収型の場合は、Line-A でのみ堤体背後1m域の平均に $C_t \leq 0.5$ の有効範囲がみられ、それは $\lambda/B = 4.0 \sim 5.3$ の範囲であり、渦による攪乱型より長波長域に存在している(図-4(c)参照)。有効領域($C_t \leq 0.5$ 及び $C_t \leq 0.6$ の測定点)は、箱形では $\lambda/B = 4.0$ にみられるのみである。渦による攪乱型では $\lambda/B = 3.3, 4.0, 5.0$ と波長が長くなると有効領域は大きく減少するが、エネルギー吸収型では、逆に増大する(表-3(b)参照)。

以上、斜め入射波に対しては直入射波の場合より消波効果は低下し、箱形はほとんど効果が見られず、直入射

波に対して最も効果のみられた渦による攪乱型の効果は大幅に減少した。エネルギー吸収型については斜め入射波による消波効果の低下は比較的小さかった。このような斜め入射波での消波性能の低下は、堤体の挙動が直入射波時には見られない法線方向の運動や係留配置に関連し、主に斜め係留索を軸とした回転運動が顕著となったためと考えられる。

3.2 2次元水路実験での消波性能

図-6は2次元水路実験及び3次元平面実験(消波堤3基配置・直入射波)で得られた消波性能曲線(λ/B)を示したものである。

a) 2次元水路実験での消波性能 消波堤堤端か

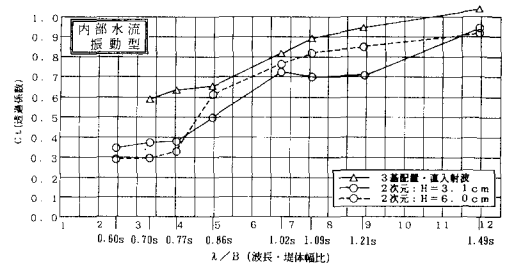
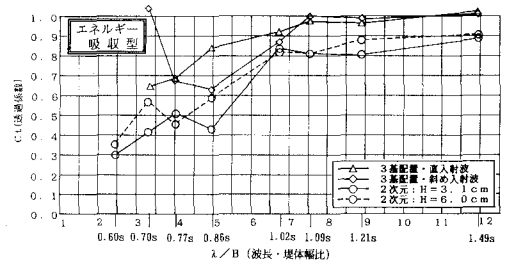
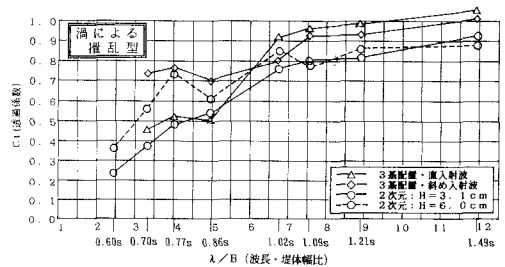


図-6 消波性能曲線 (2D, 3D)

ケースNo	浮消波堤構造	入射波 (cm)	$C_t \leq 0.5$ (黒)						
			$C_t \leq 0.6$ (白)						
11	渦による攪乱型	H=3.1 H=6.0	2	3	4	5	6	7	8
12	エネルギー吸収型	H=3.1 H=6.0	2	3	4	5	6	7	8
13	内部水流振動型	H=3.1 H=6.0	2	3	4	5	6	7	8

図-7 $C_t \leq 0.5$, $C_t \leq 0.6$ となる λ/B (2D, 入射波高変化)

らの回折波を除いたことにより、 $C_t \leq 0.5$ が確保できる λ/B の範囲は、渦による攪乱型で $\lambda/B \leq 4.5$ 、エネルギー吸収型で ≤ 5.3 、内部水流振動型で $\lambda/B \leq 5.0$ となる。3次元平面での消波堤3基設置・直入射波での値は夫々、 $\lambda/B \leq 3.8, \leq 3.6, \leq 4.1$ であり、3次元平面においては2次元水路でより、 $C_t \leq 0.5$ の確保できる λ/B の範囲は渦による攪乱型と内部水流振動型では λ/B で1.0程度、エネルギー吸収型では1.7程短波長(周期)側に移行する。このエネルギー吸収型での低減が大きいのは、他との堤端部の形状の違い(エネルギー吸収型の端は壁状、他は遊水部)による回折波の差異に加え、2次元では堤体へのエネルギーの取り込みが効率良く機能するが、3次元では堤体外への散乱が大きく消波性能が低下するような消波機構による面も考えられる。

b) 入射波高の消波性能に及ぼす影響 図-7は入射波高 $H=6.0$ cmと $H=3.1$ cmでの $C_t \leq 0.5$ 及び $C_t \leq 0.6$ の有効範囲を示したものであり、 $H=6.0$ cmの有効範囲は渦による攪乱型で $\lambda/B \leq 3.3$ 、エネルギー吸収型で $\lambda/B \leq 4.4$ 、内部水流振動型は $\lambda/B \leq 4.6$ と $H=3.1$ cmに比べて夫々30%、15%、10%程度短波長側に移行し、消波性能が低下する。

4. 結 論

本水槽実験の結果から浮消波堤計画の基礎資料として以下の結果が得られた。

(1) 3次元平面での消波効果を透過係数 $C_t \leq 0.5$ が確保できる λ/B の範囲(有効範囲)を指標としてみると2次元水路での性能より λ/B で1.0程度短波長側に移行し、2次元水路での有効範囲からみて10~15%程度性能が低下すると云える。

(2) 斜め入射波においては、見かけの堤体幅、堤体長が長くなり、開口幅が狭くなることからその消波性能は直入射波時よりも向上するといわれるが、実験の結果では消波方式により差があるものの全般に消波性能は低下した。これは堤体運動が直入射波時には見られない法線方向の運動や、本実験で採用した係留方式では斜め係留を軸とした回転運動が重なった挙動を呈し、堤体の運動に依存するような消波機構が十分に機能しないことによる影響と考えられる。

(3) 実海域での浮消波堤は複数基が設置される場合がほとんどであり、背後の静穏域に対し堤体間開口部からの回折波の影響は無視できないものであるが、堤体端部の形状により静穏域の確保状況に最大で30%程度の差が見られた。

(4) 入射波高を消波対象波の2倍程度と高くすると $C_t \leq 0.5$ が確保できる λ/B の範囲(有効範囲)は渦による攪乱型で30%、エネルギー吸収型で15%、内部水流振動型で10%程短波長側に移行し、消波性能は低下するものの、このような異常時の波に対しても一応の消波効果は期待できる。

(5) 本実験は浮消波堤の寸法諸元を統一した模型により実験を行ったが、実験を通して夫々の消波方式に対して最適な諸元があることを強く認識するに至った。今後、消波性能の検討を行うにあたっては個々の構造について消波機構が有効に機能するような特性を生かした設計が必要である。また、今回は堤体運動と消波効果とを定量的にとらえるような実験計測が行えなかったが、この点も今後の課題となろう。

本研究は、平成3年度官民交流共同研究の一環として行った水理模型実験である。

謝辞：本実験を行うにあたり、有益な助言、協力を頂いた(財)漁港漁村建設技術研究所、三菱重工業㈱、日立造船㈱、石川島播磨重工業㈱の関係各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 日本船用機器開発協会(1974): 大型浮遊式海洋構造物の調査研究事業報告, pp. 205-244.
- 高木儀昌, 末永慶寛, 佐久田昌昭(1988): 複数の振動水柱を有する波浪エネルギー吸収装置に関する研究—その1 エネルギー吸収特性—, 関西造船協会誌, 第209号, pp. 123-131.
- (社)日本水産資源保護協会(1979): 浮消波堤評価基準, 78 p.
- 海洋科学技術センター(1981): 浮消波堤に関する調査報告, 122 p.
- 佐井正明, 門野明, 磯崎芳男, 池上国広(1991): 外洋型浮消波堤の開発, 日本水産工学会学術講演会論文集, pp. 57-58.
- 大楠 丹, 柏木 正, 池上国広, 尾崎雅彦, 磯崎芳男(1991): 内部自由水を利用する浮消波堤の消波性能に関する研究, 日本造船学会論文集, 第169号, pp. 215-222.