

浮体と没水水平版によるハイブリッド消波堤の 水理特性に関する研究

小島 治幸*・入江 功**・池崎 靖***

1. ま え が き

沿岸域の高度で多様な利用に伴い、海水交換を妨げず広範囲の海域を静穏にする消波構造物が望まれている。このような構造物として没水水平版と浮体を組み合わせたハイブリッド消波堤を提案し(小島ら, 1993), その波浪制御効果を明らかにした。この構造物は、没水水平版による波長の長い波に対する消波効果の発揮とともに波長を短縮する機能(小島ら, 1989)と浮体構造物による波のエネルギーが水面近くに集中している比較的波長の短い波に対する消波効果という異なる周波数特性の特徴を利用して、より優れた波浪制御効果を期待するものである。また、潮位による大きな水位変化がある場合や海岸海洋工事における作業の稼働率を高めるための簡易的な消波構造物を考える場合は、このハイブリッド構造物を係留する方式が考えられる。この場合、浮体と水平版の相対的な位置を適切に選ぶことにより波浪による動揺を抑え堤体を中立に保ち、有効な波浪制御効果を維持することが期待される。

本研究は、環境的に優れた特徴を有している水平版と浮体を固定して組み合わせた形の透過性構造物およびそれらを係留して運動を許容した形の係留式浮消波堤の波遮断効果や作用波力等の水理特性を水理実験と理論計算により明らかにすることを目的とする。この際、固定した状態と運動を許容した係留状態の2つに分け、それぞれの水理特性を調べるとともに、堤体の諸元と係留状態の場合は係留方式等を変えて水理特性の比較検討を行う。

2. 水理実験と数値解析の概要

2.1 水理実験の方法と条件

実験は、一端に吸取式造波装置を持つ2次元造波水路(長さ28m, 幅0.3m, 高さ0.5m)を用い、水槽のほぼ中央に堤体を設置した。水深(h)は0.35mの一定とし、入射波はすべて規則波とし相対水深を $h/L=0.08\sim 0.50$ と0.02刻みで変化させた。入射波の振幅(ζ_0)は、固定

状態で $\zeta_0/h=0.03\sim 0.10$ 、係留状態で $\zeta_0/h=0.03\sim 0.06$ と変え波高の影響を調べた。入射波高は、造波機の前面7mに設置した容量式波高計でペン書きレコーダに記録した。また、構造物の後2.5mのところに設置した波高計より得られたデータから通過率を求めた。水平波力の測定は、森平ら(1964)を参考に次のように行った。堤体の前後に一辺15mmのアルミ棒を垂直に取り付け、その棒の上下2点の表面と裏面に歪みゲージをはりつけ、アルミ棒の上下2点における曲げモーメントの差より、水平波力を求めた。鉛直波力の測定には圧力計を水平版の上面と下面および浮体の底面に埋め込んで波圧分布を測定し、それを積分することにより、その大きさを求めた。計測データをサンプリング周波数20Hzでデジタルデータレコーダに記録し、データ解析を行った。

a) 固定状態の条件

固定状態の実験においては、アクリル製の水平版と木製の浮体をアルミ板を用いて固定し実験を行った。堤体の諸元は、図-1の断面の概略図に示すように、水平版長を B_p 、その没水深を h_a 、浮体長を B_f 、浮体の喫水を h_f 、水平版と浮体の間隔を W_s 、全堤体長(浮体間隔)を W_f と定義し、これらを変化させたときの水理特性を検討した。なお、水平版の版厚はすべて $0.05h$ とした。

b) 係留状態の条件

係留状態における実験では、図-1に示すようにアクリル板と木製の板で製作した水平版と浮体をL字型の角度で結合し、表-1に示すように非弾性索を用いて緩係留した場合(CASE1)と4本のばね(ばね定数=4.25kgf/m)で水平版から係留した場合(CASE2)、水平版と浮体の間隔を $W_s/h=0.90$ とし、堤体長(W_f)を

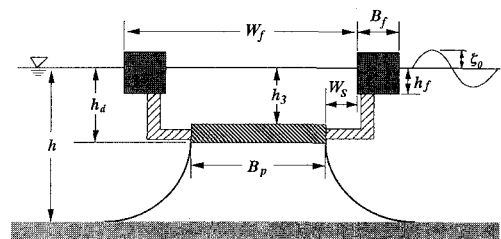


図-1 ハイブリッド消波堤の断面図と諸元の記号

* 正会員 工博 九州共立大学工学部土木工学科

** 正会員 工博 九州大学工学部建設都市工学科

*** 学生会員 九州大学大学院

表-1 係留状態における水理実験の条件

	B_p/h	B_f/h	W_s/h	W_f/h	h_s/h	h_f/h	重心の水 深 (cm)	係留方式
CASE 1	1.00	0.20	0.00	1.20	0.19	0.10	6.74	非弾性索
CASE 2	1.00	0.20	0.00	1.20	0.19	0.10	5.37	弾性バネ
CASE 3	1.00	0.20	0.90	3.00	0.19	0.10	6.86	弾性バネ
CASE 4	1.00	0.20	0.90	3.00	0.19	0.10	7.44	非弾性索

変化させて弾性係留した場合 (CASE 3) と非弾性索で緩係留した場合 (CASE 4) を行い、係留方式や断面形状による消波効果や作用波力、堤体の動揺等の水理特性を比較した。係留は左右対称のオープントイプとした。弾性係留ばねの初期張力は、一本当たり鉛直方向に CASE 2 では 500 gf, CASE 3 では 344 gf とし、係留角度を水平床から CASE 2 では 34.0° , CASE 3 では 40.5° とした。CASE 1 と CASE 4 では重心位置の許容変位を中心位置から水平方向に左右 5 cm づつとした。また係留状態では、堤体の動きをビデオカメラで記録し、水平版と水槽にそれぞれ設けたマーカーとグリッドから、堤体の重心の鉛直変位 (Heave) と水平変位 (Sway) および回転変位 (Roll) を求めた。なお、波力や運動の変位は、4~6 波の波作用下における平均値とした。

2.2 理論解析法

理論計算は、吉田ら (1990) が提案したポテンシャル接続法 (選点解法) を用いて、固定状態における波と構造物との線形干渉問題を解き、速度ポテンシャルを求め通過率と反射率を算定した。また、速度ポテンシャルより構造物の各面に作用する圧力分布を求め、その圧力分布を各作用面に対して積分することにより波力を算定した。なお、計算においては構造物の端点で生じる渦や水平版上で起きる砕波等によるエネルギー損失は無視した。

3. 結果と考察

3.1 固定状態

a) 実験値と理論値との比較

図-2 は、固定状態における波高が $\zeta_0/h=0.03$ の場合の実験および計算結果で、上図に水平版の上面と下面に働く鉛直波力 F_{PU}, F_{PL} とそれらの合力 F_{PT} を示し、下図に前後の浮体に働く鉛直波力 F_{F1}, F_{F2} および水平版と浮体を一体としたときの全鉛直波力 F_{ZT} を示している。それらの波力値は、波力の振幅を $\rho g \zeta_0 h$ (ρg =水の単位重量) で無次元化した波力係数值を表している。水平版と浮体の各面に作用する鉛直波力の計算値と実験値を比較すると、波力のピーク値とそれが零となる近傍では理論値と実験値との合致があまりみられない。これは、エネルギー損失を理論計算では考慮していないためであると

考えられる。その他のところでは全体的にみて両者の一致は良好であり、水平版と浮体が一体と考えたときの全波力 F_{ZT} についても妥当な結果が得られているといえる。

図-3 は、上に示したケースにおいて波高 $\zeta_0/h=0.03, 0.06, 0.10$ と変えた場合の実験結果と計算結果で、上図に全鉛直波力と全水平波力を示し、下図に通過率を示している。波高が大きくなるにつれて全鉛直波力と通過率

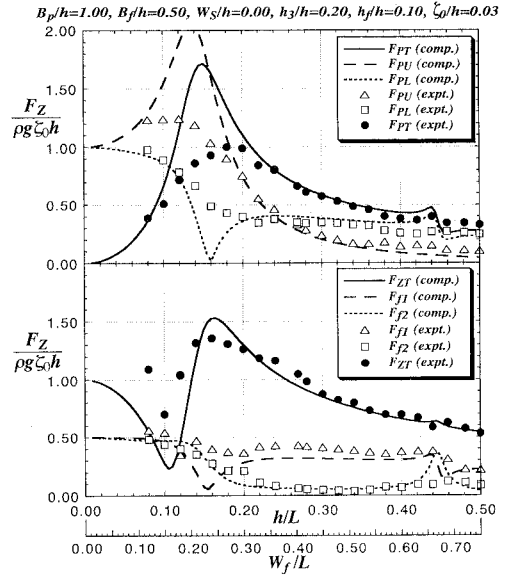


図-2 ハイブリッド消波堤の水平版と浮体に作用する鉛直波力

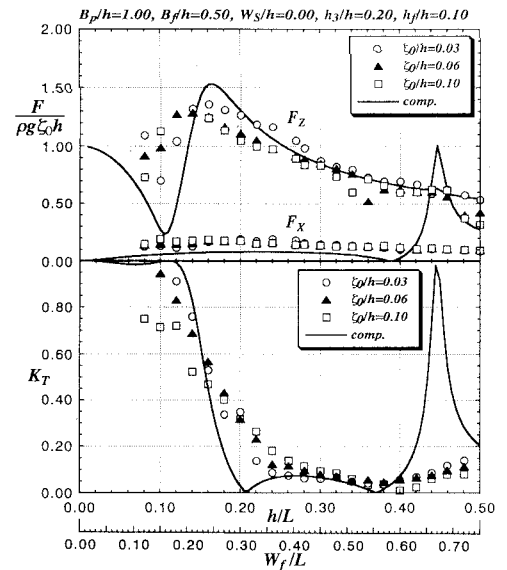


図-3 堤体に作用する全鉛直波力と全水平波力および通過率

における波長の長いところで理論値と実験値があまり一致していない。また、入射波の相対水深 $h/L=0.45$ 付近で水平波力 (F_x) と通過率 (K_T) の理論値と実験値が大きく異なっている。微小振幅波理論によると、この相対水深の入射波が水深 $h_3/h=0.20$ の水平版上の水域を通過するときの相対水深は $h_3/L_s=0.133$ ($L_s/h=1.50$) となり、堤体長と波長とが等しくなるため、理論計算では共振現象が表れ、水平波力は極端に大きくなり、通過率は1になっている。しかし、実際の現象では渦度運動によるエネルギー損失や非線形効果等があるため、その現象が顕著には表れず、実測値の水平波力や通過率が理論値に比べ小さくなっていると思われる。また、共振現象による波力特性への影響は、鉛直波力よりも水平波力に強く表れており、 $h/L=0.45$ 付近で水平波力が急激に増大し最大値となっている。これは、浮体の内側の壁面に作用する水平波力が顕著に大きくなるとともに、前後の浮体に作用する水平波力の位相が等しくなるためである。両図から波力がピークとなる相対水深と通過率が最小となるそれとが異なり、相対水深が0.30より大きい所では、鉛直波力と通過率ともに小さく、実用に際して有利である。

ここには示していないが、浮体を離れた場合や浮体が水平版上の水域に重なった状態で入り込むような場合においても、水平版の上面に作用する鉛直波力のピーク値で不一致となる以外は、理論値と実験値の一致は良好である。

b) 形状パラメータによる水理特性の変化

図-4は、 $B_p/h=1.00$, $B_f/h=0.50$ の一定として水平版と浮体の間隔 W_s/h を大きく、つまり浮体を水平版から離していった場合の堤体に作用する全鉛直波力と全水平波力および通過率を表している。 W_s/h が大きくなるにつれ、水平波力はそれほど変わらないが、鉛直波力はおのこの受圧面積が同じであるにもかかわらずピーク値が増大する。特に、相対堤体長 $W_f/L=1.00$ 付近では、水平版の上下面に作用する波力の位相が一致し、それに掛かる合力はそれらを足し合わせた値となり、この波力が全鉛直波力に対して支配的となる。また、通過率に関しては、 W_s/h が増大するにつれ有効な通過率を与える波長帯域が狭くなり、その極小値が増大し消波効果が低下する。これより、 W_s/h が小さい場合のほうが波力、通過率とも低く抑えることが可能であり、またどの場合も鉛直波力と通過率の両方を最小とする最適な相対堤体長は $W_f/L=0.5$ 付近である。

図-4のケースとは逆に、浮体が水平版上の水域に入り込んだ場合の結果を表しているのが図-5である。 W_s/h のマイナスの値は、 $W_s/h=0.00$ よりも浮体の内端が水平版上の内側に入っていることを意味している。鉛

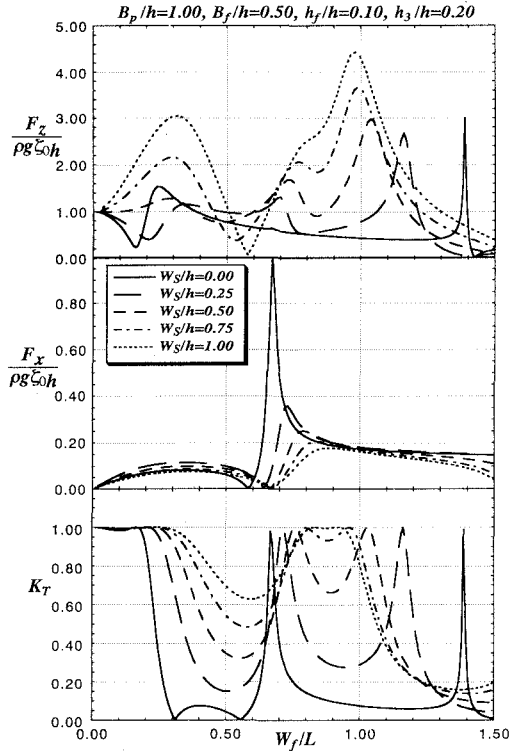


図-4 浮体と水平版間隔による水理特性の変化

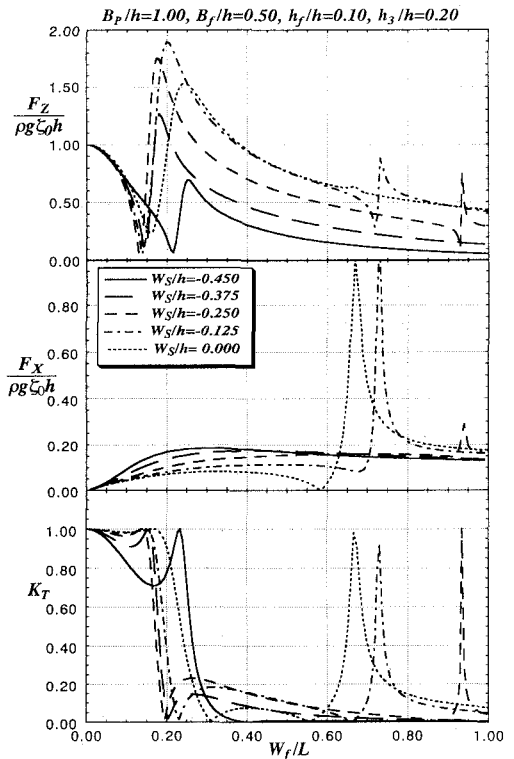


図-5 浮体と水平版との重合長による水理特性の変化

直波力は、浮体が入り込む、つまり浮体間隔が狭くなるほどその値が著しく低下している。水平波力は、水平版上の水域における波長と堤体長が等しくなるときに起こる共振現象により波力が増大し、浮体間隔が狭くなるにつれ、それが起こる波長が短くなる。また、相対堤体長が小さいところでは、水平波力は小さい値ではあるが、浮体間隔が狭くなるほど増大する傾向が見られる。通過率においては、浮体が水平版上の水域に入り込むほど有効な消波効果が得られる波長帯域が浮体の若干の移動にもかかわらず顕著に広がる傾向がみられる。従って、波長が短い波に対しては、堤体をかなり小さくしても、波力と通過率を小さくすることが可能である。

図-6は、固定状態で B_p/h , W_s/h , B_f/h , W_f/h を一定として、水平版と浮体の鉛直方向の間隔を水深の0.1倍と固定して水平版の没水深 h_3/h と浮体の喫水 h_f/h を大きくした場合の結果を表している。これは、潮位変化により水面が上昇したことに対応している。 h_3/h と h_f/h が大きくなるとそのピーク値付近よりも相対水深の大きいところで鉛直波力は小さくなり、浮体の受圧面が大きくなるため水平波力は逆に大きくなる。通過率を見てみると、 h_3/h , h_f/h が大きくなるにつれ、通過率がほぼ零となる消波効果の良い波長帯域が広くなり、相対水深の大きい方へ移動する。この消波効果の結果は、没水深が大きくな

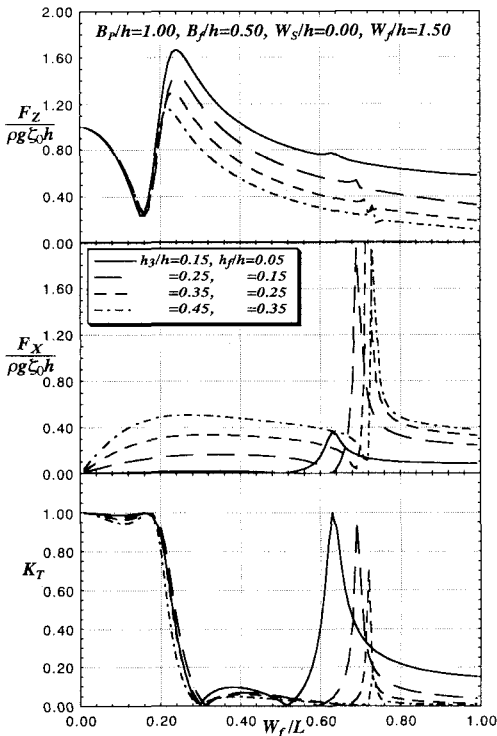


図-6 水平版の没水深と浮体の喫水による水理特性の変化

ると没水水平版を単独に用いた場合の消波効果が著しく低下する傾向 (小島ら, 1990) と異なるところである。ここには示していないが、浮体の喫水を $h_f/h=0.10$ の一定として h_3/h のみを大きくした場合は、鉛直波力は上の結果と同様に小さくなるが、水平波力はほとんど変わらない。しかし、通過率に関してはその最小値が若干増大しながら相対水深の大きい方へ移動する傾向がある。

3.2 係留状態

a) 係留方式の違いによる水理特性の変化

図-7は、波高が $\zeta_0/h=0.03$ における浮体と水平版の間隔を $W_s/h=0.00$ で緩係留 (CASE1) または弾性係留 (CASE2) し運動を許容した場合とそれを固定した場合 (計算) の結果で、上図は鉛直波力を、下図は通過率を示している。固定状態と比べて、構造物の受ける鉛直波力は著しく小さくなるが、波遮断効果は相対水深の小さいところで逆に低下している。また、固定状態においては沖側の浮体に働く鉛直波力の方が岸側の浮体に働く鉛直波力よりも常に大きくなるのに対して、係留状態においてはその逆となる場合がある。鉛直波力は係留方式によってほとんど変わらないが、通過率は弾性係留の方が緩係留より若干良い結果となった。ここには示していないが、堤体の Heive, Sway と鉛直波力および通過率との関係を見たが、相対水深に対する鉛直波力の変化と堤体の運動変位との相関は認められなかった。

b) 断面形状の違いによる水理特性の変化

係留消波構造物において、通過率を低減するためには、波による運動を極力抑えて固定状態に近づけるか、あるいは堤体の運動によって励起される radiation waves と固

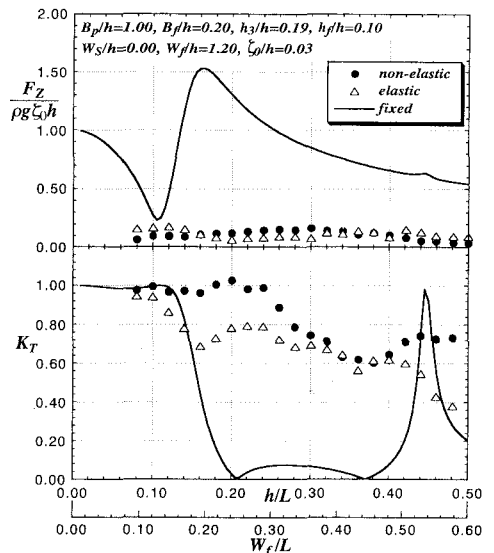
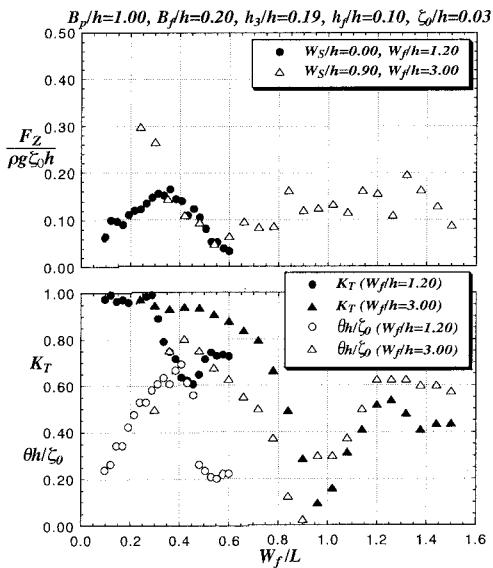


図-7 係留方式による全鉛直波力と通過率の変化



図一八 相対堤体長に対する全鉛直波力と通過率の変化

定状態と見なしたときの通過波との位相差による相殺に起因する消波効果が考えられるが、著者らの研究(1993)によると、浮体と水平版の間隔を適切に選定することにより、それぞれに作用する波力の位相の違いから回転運動を抑えることにより波遮断効果が良好になることが分かった。図一八は、そのときの鉛直波力の相対堤体長に対する変化を、通過率と回転角とともに示したものである。丸印が $W_s/h=0.00$ で堤体長が $W_f/h=1.20$ (CASE 1) の結果、三角印が $W_s/h=0.90$ で堤体長が $W_f/h=3.00$ (CASE 4) の結果である。 $W_f/h=3.00$ において、堤体長が波長程度になると回転運動 (Δ) が減少し、通過率 (\blacktriangle) がそれにともない低下し、最小値は 0.2 以下となる様子がうかがえる。これは、井島ら (1978) が指摘した鉛直流体力による浮体構造物の鉛直運動に起因する波の遮断効果であると思われる。しかし、堤体に作用する鉛直波力はそれほど大きな変化はせず、全体的に小さい値となっている。また、今回の結果によると、井島ら (1978) が示した低周波域 (相対堤体長の小さい領域) のところに現れる水平流体力による浮消波堤の水平運動とそれに連成する大きな回転運動に起因する通過率の低下

は、 $W_f/h=1.20$ の CASE 1 における $W_f/L=0.40$ 付近に若干現れてが、 $W_f/h=3.00$ のケースには見られなかった。

4. あとがき

1) 固定状態においては、浮体と水平版の間隔を離すよりはなるべく近づけたほうが波力、通過率とも低く抑えることが可能であり、また鉛直波力と通過率の両方を最小とする最適な相対堤体長は $W_f/L=0.5$ 付近である。波長の短い波に対しては、浮体を水平版の上に重ねた構造が鉛直波力と通過率を低く抑えるのに有利である。この場合、浮体間隔が狭いほど鉛直波力が小さくなり有効な消波効果を示す波長帯域が広がる。潮位変化による水平版の没水深と浮体の喫水の増大により、水平波力は増加するが、鉛直波力は減少し消波効果も良好になる。

2) 係留状態においては、固定状態に比べて鉛直波力は著しく低減し、係留方式の違いによる鉛直波力の変化は小さい。また、回転運動を制御することにより、通過率および鉛直波力を低下させるすることが可能である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、九州大学工学部吉田明德助教授より貴重なご助言を頂き、九州大学工学部技官牛房幸光氏、当時九州共立大学学生小磯卓也、足立昌也君より真摯なる協力を得た。ここに感謝の意を表す。また、本研究は五洋建設 (株) からの受託研究による成果の一部であることを付記する。

参考文献

井島武士・吉田明德・山本督夫 (1978): 任意断面浮体の 2 次元係留運動と波の変形, 土木学会論文集, 第 272 号, pp. 53-63.
 小島治幸・井島武士 (1989): 没水水平版による波の分裂と波浪制御に関する研究, 海岸論文集, 第 36 卷, pp. 529-533.
 小島治幸・井島武士・吉田明德 (1990): 没水水平版の消波特性と波分裂による波浪制御効果, 海岸論文集, 第 37 卷, pp. 594-598.
 小島治幸・入江 功・古賀 巖 (1993): 浮体と没水水平版のハイブリッド構造物による波の制御, 海岸論文集, 第 40 卷, pp. 631-635.
 森平倫生・柿崎秀作・合田良実 (1964): カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, 第 3 卷 1 号, pp. 1-27.
 吉田明德・小島治幸・鶴本良博 (1990): 波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法, 土木学会論文集, 第 417 号/IF-13, pp. 310-319.