

空気潜袋堤の消波性能改善に関する研究

上床隆彦*・井島武士**・小島治幸***

1. ま え が き

著者等は先に図-1 に示すような空気潜袋堤による波遮断効果について報告し、潜袋堤が没水消波堤として有効であることを示した^{1),2)}。また、この消波堤の波遮断効果を改善するために図-2 に示すような方法を実験により見出した³⁾。

- (1) 各々の潜袋に上端開口の円筒形パイプを被せる。
- (2) 潜袋を固定するためのフレームを不透水性の水平板に置きかえる。
- (3) 水平板を潜袋堤の沖側に没水係留する。

これらの改善法は、それぞれ円筒形パイプと水平板によって波長の短い波や波長の長い波に対する消波効果を期待しているものである。本論文では、図-2 に示すような円筒形パイプ付の空気潜袋堤に水平板を加えた消波システムに対する微小振幅波による数値解析をグリーン関数を用いた周辺積分法により行ない、それぞれの改

善法に対する波の通過率 K_t を求め、その消波性能を確かめる。さらに、円筒形パイプの効果を数値計算による造波率 K_w によって、潜袋のみの場合と比較している。また、水平板の効果を水平板付近の流体運動を流線で示すことにより明らかにしている。次に、この不透水水平板を潜袋と組合せて現場で係留して使用する際に問題となるのは、揚圧力が大きくなることから、係留力が増大することのある。そこで、水平板に適当な間隙を設けて（これを「スリット水平板」とする）、揚圧力を低減させる方法が考えられるが、この場合スリットが大きくなり過ぎると、波遮断効果が低下するので、有効なスリット間隔を推定する必要がある。本論文では、スリット間隔の大きさが波遮断効果および揚圧力の減圧効果に与える影響をポテンシャル関数に関する2次元解析により求め、スリット付近の流体の流れを示して、実用的な間隔の大きさについて予測し、消波性能改善案について検討を加えている。

2. 改善した消波システムに対する数値計算

図-1 に示す潜袋堤が没水消波堤として効果的である例として、潜袋堤を波長の3倍程度に波岸線方向に長くした場合の波高分布を示したものが図-3 である。水深 $h=40$ cm, 潜袋間隔 $B=80$ cm で水底に固定した潜袋堤に $B/L=0.5$ (L は波長) を作用させた例で、消波効果の高い周波数ではあるが、回折波も見られず、堤内、堤外の水域とも潜袋堤により静穏な状態が保たれており、海水交換も自由に行なわれているのが分かる。⁴⁾

次に、図-2 に示すような消波システムは、実験により、円筒形パイプと不透水水平板によって主として波長の長い波を有効に遮断していることが分かっている。そこで、図-2 に示す改善法に対する波の通過率 K_t の数値計算をグリーンの方法による2次元計算を用いて求めた結果が図-4 である。数値計算方法の詳細については、文献 2) に示しているのでここでは省略する。図-2 において、空気潜袋の周囲に不透水剛体の円筒を立てた場合について、計算の便宜上、潜袋は2次元形状とし、円筒は2枚の鉛直壁におきかえる⁵⁾。また、潜袋は2個で一対とし、水底に固定されているとする。消波システム

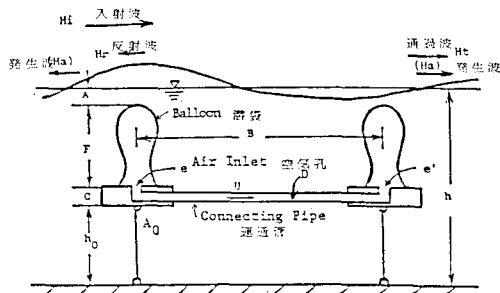


図-1 空気潜袋堤

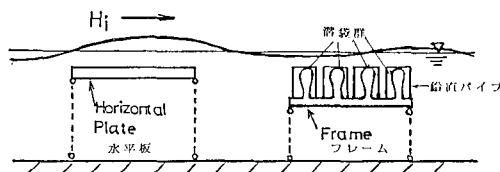
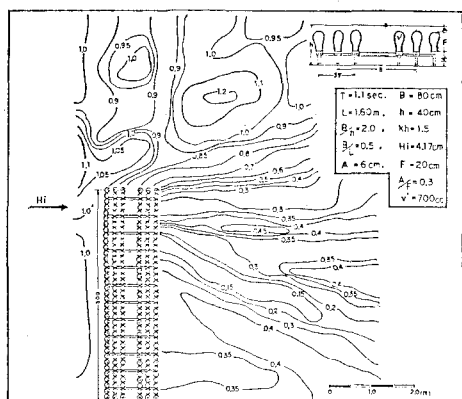


図-2 空気潜袋堤を改善した消波システム

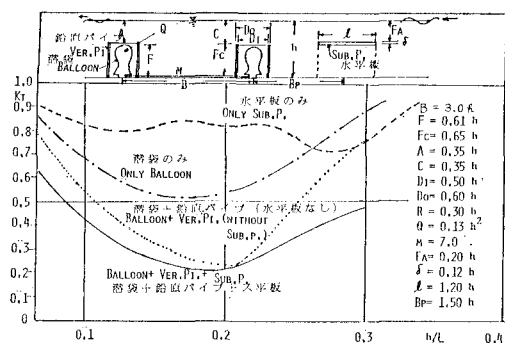
* 正会員 工博 大分高等教授 土木工学科

** 正会員 工博 東和大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 九州大学助手 工学部土木工学科



図—3 潜袋堤付近の波高分布図 (平面水槽実験)



図—4 円筒形パイプと水平板を組合わせた潜袋堤の波の通過率

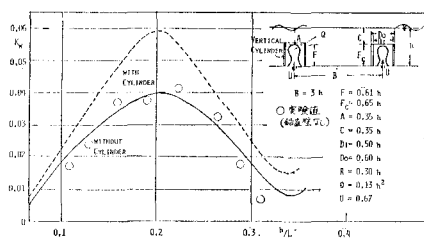
は、潜袋高 $F=0.61h$ 、潜袋間隔 $B=3h$ 、天端水深 $A=0.35h$ 、鉛直壁高さ $F_c=0.65h$ 、間隔 $D_0=0.60h$ の潜袋堤の沖側 $B_p=1.50h$ に板長 $l=1.20$ 、厚さ $\delta=0.12h$ 、天端水深 $F_A=0.2h$ の不透過水平板が没水係留されているとする。計算結果は水平板のみを破線で、潜袋のみを一点鎖線で、潜袋と鉛直壁の組合せを点線で、潜袋と鉛直壁と水平板との組合せを実線でそれぞれ示している。この結果によると、鉛直壁を組合せると潜袋のみの場合に比べて $h/L \div 0.2$ で K_t は大きく低下して波遮断効果を高めていることが分かる。さらに水平板を組合せると $h/L \div 0.1$ の比較的波長の長い領域で K_t がやや低下していることが分かる。これは、微小振幅波による計算では、水平板のみの場合の K_t と潜袋と鉛直壁の組合せの K_t との重ね合せにより低下したものである。図—4 の結果は先に実験により得られた波の通過率の傾向と類似していることが分かる。³⁾

3. 円筒形パイプと水平板の効果要因

円筒形パイプ (鉛直壁) と不透過水平板がそれぞれ波遮断効果を高めている要因を数値計算により説明すると次の通りである。

3.1 円筒形パイプ (鉛直壁) の効果要因

鉛直壁の効果は、鉛直壁がない時は潜袋の体積変化によって近傍外部流体を水平方向に排除したものが、鉛直壁を設けると潜袋との間の流体は鉛直に流動する傾向が大きくなり、そのため、水面の上昇と低下が促進されると解釈されるが、このことを示したものが図—5 である。図—4 と同一条件の鉛直壁付の潜袋の底面孔から一定の空気を左右交互に周期的に流入させ、袋の変形によって水面に発生する波高と水面との比を造波率 K_w として 2 次元数値計算により示している。図—5 によると、鉛直壁を取り付けると (破線)、 K_w の極大値は $hL \div 0.2$ で鉛直壁のない場合 (実線) のその 1.5 倍に上昇しており、上記の解釈を裏付けている。なお、 K_w の数値計算法は文献 5) に示している。図—5 には水深 30 cm、水路幅 30 cm の造波水路での鉛直壁のない場合の実験値を○で示しており、計算値 (実線) と変化傾向は一致している。



図—5 空気潜袋の変形による波の発生率

3.2 不透過水平板の効果要因

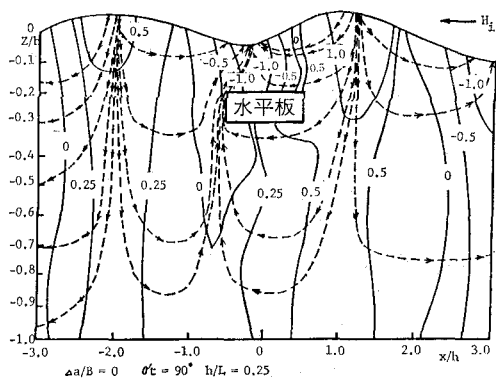
潜袋を固定するフレームを不透過性の水平板に置きかえるか、またはフレームを透過性にして水平板を単独に潜袋堤の沖側に没水係留した場合の効果の要因は、図—4 において、破線の水平板のみの数値計算で、波の通過率 K_t を含む境界値のみならず、任意点の速度ポテンシャルを求め⁴⁾、水平板付近の等ポテンシャル線および流線を描くことで推定することができる。

i) 計算条件

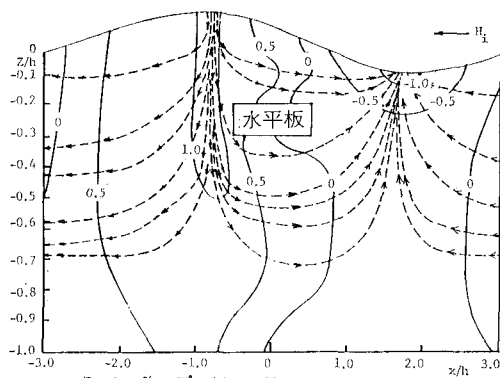
計算は、水深 h の水域に $B=h$ 、厚さ $\delta=0.1h$ の不透過水平板を天端水深 $F_A=0.2h$ で没水固定した場合について、図—4 において通過率 K_t が極小値となる $h/L=0.25$ の波および K_t が大きい値を示す波長の長い波の相対水深 $h/L=0.16$ についての速度ポテンシャルを流体域の境界面 (水面、水底面、水平板面、仮想境界面) および流体域内の任意点 (合計 100 点) について求め、時刻 $\sigma_t=90^\circ$ における等ポテンシャル線および流線を描く。

ii) 計算結果

図—6 に $h/L=0.25$ 、図—7 に $h/L=0.16$ の場合の等ポテンシャル線を実線で、流線を破線でそれぞれ示し



図—5 不透過水平板付近の等ポテンシャル線と流線
($h/L=0.25, \sigma t=90^\circ$)



図—7 不透過水平板付近の等ポテンシャル線と流線
($h/L=0.16, \sigma t=90^\circ$)

ている。これらの結果によると、例えば $h/L=0.25$ の波の水平板付近の 0 の等ポテンシャル線は水平板上面と下面で板長方向に大きくずれているのに対して $h/L=0.16$ の波では、水平板上面と下面でのずれは少ない。これは波長の短い波の場合、水平板の上の領域と下の領域で流れのずれが生じているのに対して波長の長い波の場合、流れは板面上下とも同様であり、入射波はほとんど通過していることが分かる。また、 $h/L=0.25$ の場合、0.5 の等ポテンシャル線は水面より水底まで連続しており、水平板下の流れは緩やかである。これに対して波長の長い波の場合には、1.0 の等ポテンシャル線が水平板下まで広がっており、流れが急であることが分かる。これらの結果より不透過水平板には波長の短い波が作用することによって波遮断効果を高めることが分かるが、本計算は微小振幅波を用いたため、実験結果と異っている。有限振幅波による解析が必要と思われる。

4. スリット水平板による性能改善

前述のように、没水して係留した不透過水平板は、単独で用いた場合にもかなりの波遮断を示すが、実用上港

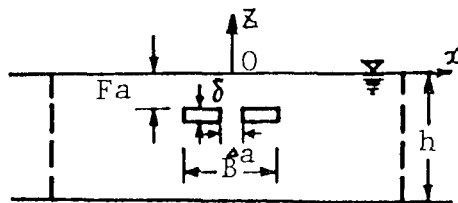
袋等と組合せて使用する際に、水平板の上下での圧力差が問題となるので、図—8 に示すように、水平板に適当な間隙を設けたスリット水平板によって、例えば揚圧力等を減圧させることを行なう。その際に、スリット水平板の波遮断効果を著しく損うことなく減圧できるスリット間隔を設ける必要がある。そこで、スリット水平板の間隙を変えた場合の波の通過率 K_t と水平板上下の圧力差を 2 次元数値解析により求める。

4.1 解析方法

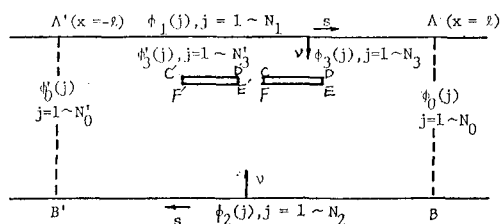
スリット水平板は図—8 に示すように、間隙のない水平板（不透過水平板）において、波の進行方向に対して直角方向に一樣な幅の間隙がある 2 次元の水平板とし、間隙幅 Δa と不透過水平板幅 B との比 $\Delta a/B$ を間隙率として表わし、間隙の大きさを示す。スリット水平板の波遮断効果および減圧効果を求める解析方法は入射波に対応する水平板付近の流体運動をポテンシャル函数に関するグリーンの公式による 2 次元周辺積分法を用いて、数値計算によって行なう。

図—9 は、図—8 に対応する計算領域を示す。流体域は自由表面と 2 つの仮想面および水底面と水平板面の不透過面を境界とする領域より成る。水平板から充分離れた位置 $x=\pm l$ に仮想境界面 AB および $A'B'$ を設け、入射波は AB から $A'B'$ に向うものとする。 AB では入射波と反射波、 $A'B'$ では通過波が存在する。反射率 K_r 、通過率を K_t とすると、水深 h で無次元化した流体域においては AB と $A'B'$ 付近でのポテンシャル函数は ϕ_0, ϕ'_0 とする、また、自由表面では ϕ_1 、水底面では ϕ_2 、水平板面では ϕ_3, ϕ'_3 とする。これらのポテンシャル函数と計算点数を図—9 に示すように定める。

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi'_3$ および K_r, K_t に関する 1 次連立方程式を解いてすべての未知数が求められる。また、流域



図—8 スリット水平板断面図



図—9 流体域のポテンシャル函数

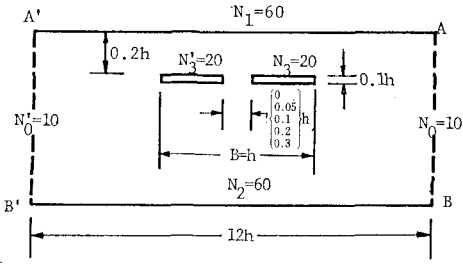


図-10 スリット水平板流体域の計算点数

内の任意点 (x, z) の速度ポテンシャルも求められる。

各時刻におけるポテンシャル ϕ は実数部を ϕ_r 、虚数部を ϕ_i とすると、次式で表わされる。

$$\phi = \phi_r \cos \sigma t - \phi_i \sin \sigma t \quad \dots\dots\dots (1)$$

本論文の計算において図-10 に示すように、仮想面間の距離 $2l$ を $12h$ とし、水平板長を $B=h$ 、間隙の幅を $0.05h, 0.1h, 0.3h$ 、板厚を $\delta=0.1h$ として計算点の数 N を図のように取る。

4.2 計算条件

計算は次の3ケースについて行った。

(1) 3.2 で行った不透水水平板と同一条件、すなわち長さ $B=h$ 、厚さ $\delta=0.1h$ 、天端水深 $Fa=0.2h$ の不透過板。

(2) 不透水水平板と同一寸法で、長さ方向の中央に間隙1個で間隙率 $\Delta a/B=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ の間隙をもつスリット水平板を不透水水平板と同一天端水深で没水固定した場合

(3) 不透水水平板の長さ方向に間隙2個を板長の1/3, 2/3 の所にそれぞれの間隙率が 0.05 (間隙全体で 0.1) の間隙をもつスリット水平板を前2ケースと同一天端水深で没水固定した場合。ただし、この場合は、図-9, 図-10 に示すポテンシャル函数と計算点数はそれぞれ $\phi_s''(j)$, N_s'' , $N_s''=20$ とする。

以上のケースについて次のような2次元の数値計算を行った。

(A) 波の通過率 K_t よりスリット水平板の波遮断効果を求める。

(B) 通過率が最小値になる相対水深 h/L の波について、流体域全体の速度ポテンシャルを求めて、等ポテンシャル線を $\sigma t=90^\circ$ の時刻について描き、スリット水平板の上および下の水域、間隙の流体の流れの様子を流線で示す。

(C) 水平板の上面のポテンシャル ϕ_u と下面のポテンシャル ϕ_l との差の分布よりスリット水平板の板長方向について圧力差を示す値(例えば揚圧力)を時刻 $\sigma t=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ について求める。

4.3 波遮断効果

図-11 に間隙が1個で間隙率 $\Delta a/B=0, 0.05, 0.1,$

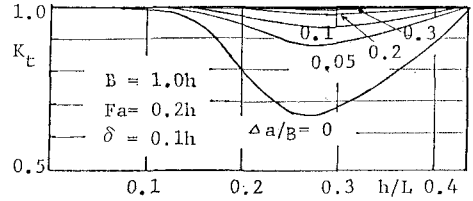


図-11 不透水水平板及びスリット水平板の通過率

$0.2, 0.3$ の時の K_t を示している。この図から、間隙率が 0.05 以下であれば波遮断効果はある程度得られる。没水水平板の K_t は一定周波数で極小値を示し、更に波長が短くなると増大して 1.0 となる。この傾向は水面上の水平板の K_t が波長の短い領域で減少するのとは異なっており⁶⁾、没水水平板の上の水域を波長の短い波が通過してを大きくしているからであると思われる。

4.4 等ポテンシャル線および流線

i) 間隙1個のスリット水平板

間隙率 $\Delta a/B=0.1$ のスリット水平板の $h/L=0.25$ の波に対する $\sigma t=90^\circ$ のときの等ポテンシャル線(実線)と流線(破線)を示したものが図-12 である。不透水水平板の等ポテンシャル線(図-6)と比べると、スリット水平板付近の0の等ポテンシャル線は板の上面と下面で板長方向のずれが殆んどなく、また 0.5 の等ポテンシャル線は水中で閉じており、間隙を設けたことにより水平板下の水域で流体が流れ易くなったことが分かる。このことが、波の通過率の上昇を招き、波遮断効果を悪化したと思われる。また水平板の間隙付近の流線から水平板の上下の流体は間隙を通過して上下方向に流れている。

ii) 間隙2個のスリット水平板

間隙1個の場合に比べるとスリット水平板付近の0の等ポテンシャル線の板上下でのずれがやや大きくなり、板長方向の板奥での等ポテンシャル線の分布が異なっている。

4.5 揚圧力の分布(減圧効果)

図-6, 図-7 および図-12 に示す各没水スリット水

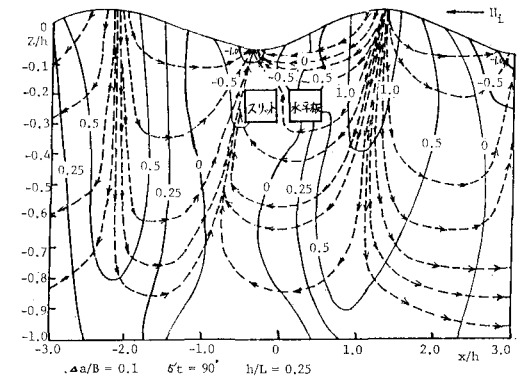


図-12 スリット水平板付近の等ポテンシャル線と流線 ($h/L=0.25, \sigma t=90^\circ, \Delta a/B=0.1$)

平板付近のポテンシャル分布によると、水平板上面と下面にはポテンシャル差が生じている。このことは、水平板上面と下面に、 $(\phi_u - \phi_l)$ に比例した圧力差が生じて、例えば下面から上面へ圧力が加えられている場合は、 $(\phi_u - \phi_l)$ は負となって揚圧力となり水平板となり水平板を押し上げる。また $(\phi_u - \phi_l)$ が正となった場合は水平板を押し下げる。これらの力が水平板を水中に保留する際に問題となり、水平板に間隙を設けて減圧する必要がある。

図-13, 14 には時刻がそれぞれ $\alpha t = 90^\circ, 0^\circ$ の時、 $h/L = 0.25$ の波に対しての板上下での圧力差（揚圧力）を板長方向について示している。図-13 は間隙1個と2個の場合で、図-14 は間隙1個の場合である。間隙率は間隙1個の場合は、 $\Delta a/B = 0 \sim 0.3$ 、2個の場合は $\Delta a/B = 0.1$ とした。また、図中には各時刻における水面波形 (η) を水平板上について示している。

図-13 では $\Delta a/B = 0.1$ のスリット水平板の圧力差は

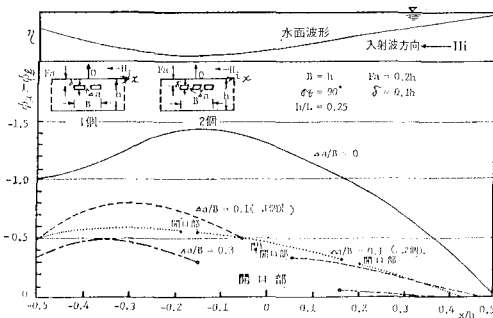


図-13 不透過水平板及びスリット水平板の圧力差分布 (スリット1個, スリット2個, $\alpha t = 90^\circ$)

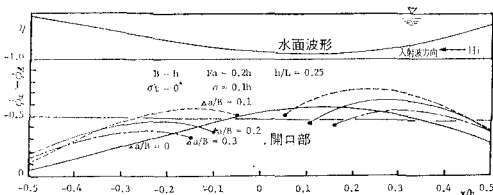


図-14 不透過水平板及びスリット水平板の圧力差分布 (スリット1個, $\alpha t = 0^\circ$)

$\Delta a/B = 0$ の不透過水平板のそれに比べて最大で半分以下となり、減圧効果が著しいが、 $\Delta a/B = 0.3$ にして間隙を大きくした場合には、減圧効果はそれほど増大しない。一方、図-11 より $\Delta a/B = 0.3$ のときは波遮断効果は殆んどないので、図-11 の結果と併せて考えると、間隙率は $0.05 \sim 0.1$ が適当と考えられる。また、間隙を2個にした場合は同じ間隙率で、圧力差の最大値が約30%程度減少しており、間隙率が同じの場合は間隙を多くした方が有利と思われる。図-14 の $\alpha t = 0^\circ$ では、圧力差は図-13 の $\alpha t = 90^\circ$ に比べて最大値で半分程度になっており、また時間によって水平板上の波の谷が移動して、圧力差の最大値の発生する場所も変化していることが分かる。

5. 結 語

空気潜袋堤に円筒形パイプおよび没水水平板（またはスリット水平板）を組合せて改善した消波システムについて、円筒形パイプを被せた潜袋堤は消波効果を増大させ、さらに間隙率5%程度のスリット水平板を潜袋に固定すると、揚圧力等も減じた消波堤が得られることが、2次元数値計算により明らかとなった。

今後、実験を継続して、上記の結果を確認して行く予定である。

参 考 文 献

- 1) Uwatoko, T., T. Ijima, Y. Ushifusa, and Y. Kojima: Wave interception by sea-balloon breakwater, Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering, Taipei, ASCE, pp. 2352~2367, 1986.
- 2) 上床隆彦・井島武士・牛房幸光: 空気潜袋群による波の遮断機構 (2次元解による考察), 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 517~521, 1984.
- 3) 井島武士・上床隆彦・牛房幸光・小島治幸: 空気潜袋堤の波遮断効果の改善に関する実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 387~391, 1986.
- 4) 上床隆彦: 空気潜袋堤による波エネルギーの吸収について, 昭和61年度土木学会西部支部夏期講習会テキスト, pp. 81~92, 1998.
- 5) 井島武士: 波浪問題における領域分割法と境界要素法, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 25~34, 1987.
- 6) 井島武士・吉田明徳・山本督夫: 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, 1978.