

二重管係留没水水平版の波浪制御に関する 線形理論の適用性と非線形効果

吉田明徳* ・長井健二** ・田代晃一***
入江 功**** ・小島治幸*****

1. ま え が き

著者らは、没水水平版の係留方法として水平版の鉛直運動のみを許容する二重管係留システムを提案し(吉田ら, 1991), 線形ポテンシャル理論による解析をおこなって、鉛直運動を許容しても有効な波浪制御効果が得られること、水平版に作用する鉛直波力を著しく減少できること等を見だし、それらの結果を昨年度の海講で報告した(吉田ら, 1992)。ただし、既往の研究(例えば、高木ら, 1988; 今井ら, 1988; 余ら, 1988; 小島ら, 1989)で報告されているように、没水深と入射波の条件によっては、非線形干渉によって高次の周波数成分の波が励起したり、版上で砕波が生じるなどの、非線形の現象が卓越する場合がある。また、水平版の鉛直動揺による版端部での渦の発生も考えられ、線形理論でどの程度現象を推定し得るかの検討をしておくことが必要である。

本文は、二重管係留システムで係留された没水水平版を対象に、微小振幅と有限振幅の波を用いた水槽実験をおこなって、線形ポテンシャル理論の適用性を検討した結果について述べるものである。

2. 研究内容

2.1 実験装置と実験内容

実験は、波吸収機能付きの造波装置を有する二次元水路(長さ28m, 幅0.3m, 深さ0.5m)を用い、水路中央付近に設置した水平版模型の前方2mの位置に前後30cm間隔で2本の容量式波高計を、また、水平版の後方2mの位置から3本の波高計を20cmと7.5cm間隔で設置し反射波形と通過波形を測定し、造波版前方2mの位置にも波高形を設置して入射波形を測定した。水平版の中央には電磁変位計を取り付け、鉛直動揺の振幅 η と、動揺中心の静止位置からの変位 $\bar{\eta}$ を測定し、同時にビデオカメラで水平版の動揺と近傍の波変形の様子を記録した。

水平版模型はアクリル版を用いて、水平版の幅 $B=70$ cm, 厚さ $D=3.0$ cm, 水路断面方向の幅29cmの箱型に作成して用いた。二重管係留システムとしては、図-1に概略を示すように、水平版に固定した円管タイプのベアリングを外管とし、水路底面に設けた滑らかな鋼棒を内管とする二重管によって水平版の係留をおこない、前回の海講で提案したモデルとは異なって、二重管による動揺特性の制御を考える場合は、図-1に示すような抵抗二重管を別途模型に取り付けて用いることとした。水平版の没水深を所定の値に設定するため、直径3.8cmの塩ビ管を4本フロートとして水平版の上面に固定し、管内部にウェイトを挿入して没水深を調節した。

実験の条件は、水深 h を35cmに固定し、水平版の幅 B を一定($B/L=2.0$)とし、3通りの没水深($h_2/h=0.15, 0.2, 0.25$)について、まず微小振幅波を対象に $kh=0.5$ (周期 $T=2.47$ 秒)から 3.0 ($T=0.69$ 秒)まで、 kh の値を0.05きざみで測定をおこなった。入射波の波高は、 kh の値および没水深によっても異なっているが、いずれも2.5cm~3.0cmの間である。

ついで、8通りの入射波長($kh=0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5$)について、波高を変化(2.0cm~10.0cm)させた実験をおこなって、入射波の有限振幅性に起因する非線形効果を調べた。いずれの場合も、データは造波版の起動後1分程度経過してから、サンプリング間隔50Hzで、反射波形、通過波形、および水平版の運動をデジタルデータレコーダに記録した。波のデー

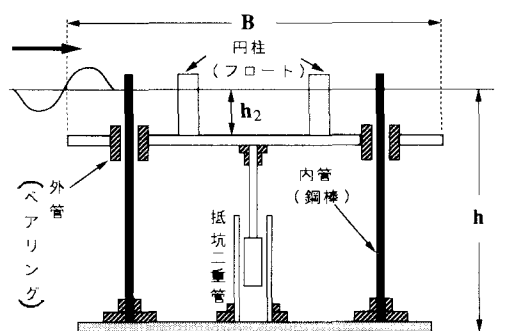


図-1 二重管係留没水水平版の実験模型の概略

* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部 建設都市工学科

** 学生会員 九州大学大学院 建設都市工学科

*** 正会員 日本国土開発(株) エンジニアリング本部

**** 正会員 工博 九州大学教授 工学部 建設都市工学科

***** 正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部 土木工学科

タは、合田 (1976) が示した分離推定法を用いて入射波、反射波、通過波に関して 3 倍周波数成分までの波高を算定し、水平版の運動データより周期動揺の振幅 η を算定し、動揺中心の静止位置からの変位量 $\bar{\eta}$ はチャートから読みとって、これら諸量の周波数特性を求めた。

2.2 微小振幅波実験の結果と考察

図-2 は、それぞれ没水深 ($h_2/h=0.15, 0.2, 0.25$) について、反射率 K_r と通過率 K_t を示しており、実線と破線は線形ポテンシャル理論 (吉田ら, 1992) による理論解である。実験に用いた入射波の波形勾配 H/L は最大でも 0.04 程度 ($kh=3.0$) であるが、後述するように、この程度の波形勾配の範囲でも、 kh の値によっては反射率と通過率が大きく変化しており (図-6, 7 参照)、図-2 の結果からのみで、実験値と理論値の定量的な合致の程度を云々しても必ずしも意味はないが、定性的には理論解は実験値を良く表しているといえる。ただし、定量的には没水深が小さくなるにつれて、また、通過率が極

小となる所より kh の値が大きくなるにつれて、両者の差が大きくなっている。

図-3 は、水平版の動揺振幅 η を入射波の振幅 ζ_0 ($H=2\zeta_0$) に対する比で示している。いずれの没水深においても実験値は理論値より小さく現れているが、 K_r, K_t の場合と較べると両者の一致は良好である。図-4 に示すように、通過波形には水平版と波との非線形干渉によって 2 倍および 3 倍周波数成分の波が励起されているが、動揺には高次成分がほとんど生じていなかったことから、動揺振幅に関しては線形理論によって十分推定できることがわかる。昨年 の海講で示した理論計算で推定された通り、 kh が 0.1 近傍のきわめて長波長の波を除くと、水平版の動揺には共振周期は存在せず、動揺振幅は入射波の波高よりも常に小さいことが確かめられた。

渦や砕波による損失エネルギーを実験値より算定するため、単位時間当たり平均の入射波のエネルギー flux を E_i 、反射波のエネルギー flux を E_r 、通過波のエネルギー flux を E_t 、渦や砕波による損失エネルギーを E_l で表すものとするとき次式が成り立つ。

$$E_i = \{E_r^{(1)} + E_r^{(2)} + E_r^{(3)} + \dots\} + \{E_t^{(1)} + E_t^{(2)} + E_t^{(3)} + \dots\} + E_l \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $E_r^{(1)}, E_r^{(2)}, E_r^{(3)}, \dots$, および $E_t^{(1)}, E_t^{(2)}, E_t^{(3)}, \dots$ は、それぞれ反射波と通過波の基本周波数成分、2 倍周波数成分、3 倍周波数成分のエネルギー flux を意味し、それぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \frac{\rho g}{8} H^2 n^{(1)} C^{(1)} \\ E_r^{(p)} &= \frac{\rho g}{8} (H_r^{(p)})^2 n^{(p)} C^{(p)} \\ E_t^{(p)} &= \frac{\rho g}{8} (H_t^{(p)})^2 n^{(p)} C^{(p)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

($p=1, 2, \dots$)

上式で $H_r^{(1)}, H_t^{(1)}, H_r^{(2)}, H_t^{(2)}, \dots$ 等は反射波および通過波の各成分波の波高を意味し、 $n^{(p)}, C^{(p)}$ は次式を意味す

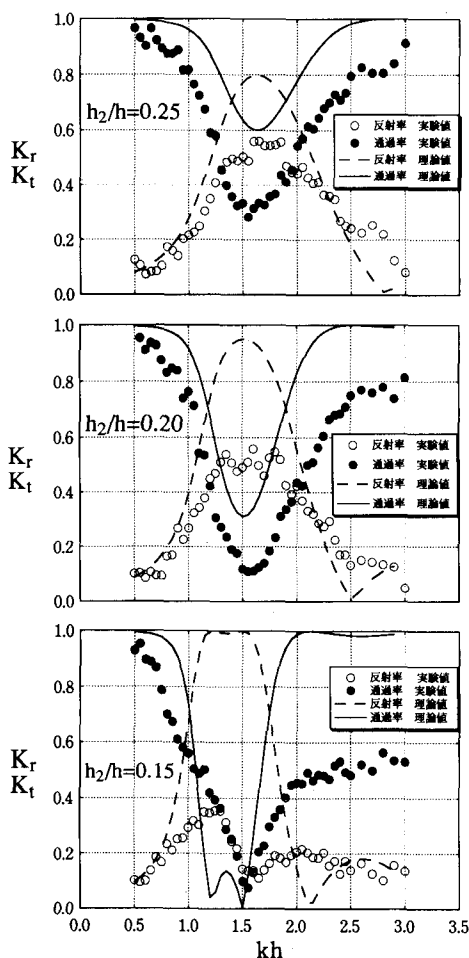


図-2 理論解と実験値の比較 (反射率 K_r , 通過率 K_t)

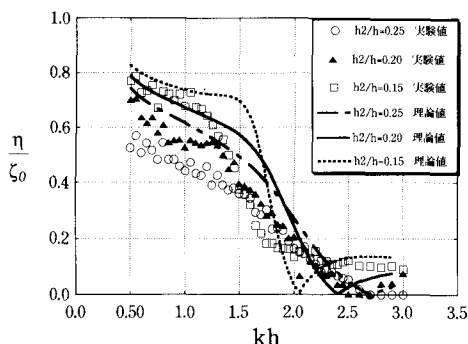


図-3 理論解と実験値の比較 (動揺振幅 η)

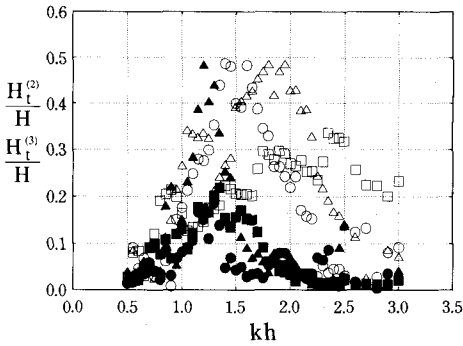


図-4 2倍と3倍周波数成分の波の波高
(○, ● $h_2/h=0.25$, △, ▲ $h_2/h=0.2$, □, ■ $h_2/h=0.15$; 白印は2倍周波数成分で黒印は3倍周波数成分を表わす)

る。

$$\left. \begin{aligned} n^{(p)} &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2k^{(p)}h}{\sinh 2k^{(p)}h} \right\}, \quad C^{(p)} = \frac{p\sigma}{k^{(p)}} \\ p^2 \left(\frac{\sigma^2}{g} \right) &= k^{(p)} \tanh k^{(p)}h, \quad k^{(1)} = k \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

固定水平版について的小島ら(1991)の実験と理論計算の結果では、反射波に含まれる高次の周波数成分のパワーは、通過波のそれに較べて格段に小さいことから、反射波に関しては基本周波数成分のみを考え、また、通過波においては3倍周波数成分以上の波は無視しても差し支えないほど小さいことから、式(1)は次のように書き表せる。

$$\frac{E_t}{E_i} = 1 - K_r^2 - K_t^2 - \left\{ \left(\frac{H_i^{(2)}}{H} \right)^2 \frac{n^{(2)}}{n^{(1)}} \frac{2k}{k^{(2)}} + \left(\frac{H_i^{(3)}}{H} \right)^2 \frac{n^{(3)}}{n^{(1)}} \frac{3k}{k^{(3)}} \right\} \dots (4)$$

これに、図-2に示す K_r, K_t の実験値と図-4に示す通過波の2倍および3倍周波数成分波の波高 $H_i^{(2)}, H_i^{(3)}$ の実験値を代入して、エネルギー損失 flux の入射波のエネルギー flux に対する割合 E_t/E_i を求めた結果を図-5に示している。エネルギー損失の割合は、 kh が增大するとともに大きくなり通過率が極小となる $kh=1.5$ 近傍で最大値を取り、 $h_2/h=0.15$ の場合には90%以上にも達している。微小振幅波実験では、 kh が1.0~1.5近傍で、版上を前方から進入する波と後方からの戻り流れ(高木・川崎, 1988)が、版中央付近で衝突して碎ける場合を除くと、大きな碎波は生じておらず、エネルギー損失の大部分は水平版端部での渦の発生に起因するものと考えられる。また、図-4に示す2倍および3倍周波数成分波の波高 $H_i^{(2)}, H_i^{(3)}$ より、入射波のエネルギーが高次の周波数成分波へ移行する割合は高々10%程度であり、この割合は次節で述べるように入射波高が大きくなるとさ

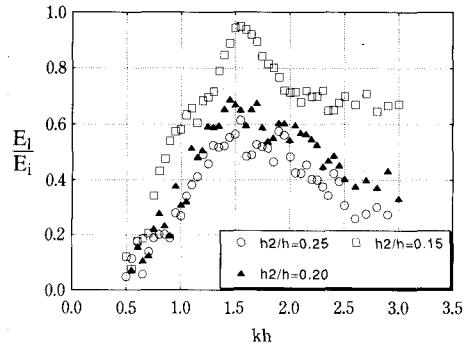


図-5 渦と碎波によるエネルギー損失の割合

らに減少し、しかも入射波の周期に無関係となる。

2.3 有限振幅波実験の結果と考察

8通りの入射波長($kh=0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5$)について、入射波の波高を変化させた実験の結果を図-6, 7, 8, 9に示している。

図-6は、波形勾配 H/L に対する反射率 K_r の変化を示している。これより、 K_r は波の有限振幅性が增大するにつれて減少し、波形勾配が0.05程度以上になると、入射波の波長および没水深に関わらず一定値(0.15~0.2)を取るようになる。同様の傾向は、図-7に示す2倍および3倍周波数成分波の波高 $H_i^{(2)}, H_i^{(3)}$ についても見られ、 $H_i^{(2)}$ は入射波の波高のほぼ20%、 $H_i^{(3)}$ はほぼ0に漸近する。これらの傾向は没水深が $h_2/h=0.25, 0.20$ の場合も全く同様に見られ、漸近する値もほぼ同じ値となる。これらの結果を見ると、入射波の波高が大きくなるにつれ、入射波の周期によらず、入射波のエネルギーが反射波および高次成分の通過波に移行される割合は、共に非常に小さくなり、入射波のエネルギーのほとんどは基本周波数の通過波と渦や碎波によるエネルギー損失とに移行することがわかる。ただし、通過率 K_t は、図-7に示すように、波形勾配の変化に対して一様には変化せず、一旦減少し、特定の波形勾配の値で極小値を取った後増大する。この様な K_t の変動の理由については、動揺中心の静止位置からの変位量 $\bar{\eta}$ および渦と碎波の発生が、波形勾配によって変化する(図-9参照)ことに起因していると考えられる。

図-8は水平版の動揺振幅の変化を示している。反射波や通過波とは異なって、波形勾配に対する動揺振幅の変化はいずれの没水深においても小さく、しかも、高次周波数の動揺成分はほとんど現れないことから、動揺振幅の推定に関しては、入射波の有限振幅性による非線形効果を考慮せずとも、実用上は線形理論による推定が可能である。

図-9は、動揺中心の静止位置からの変位量 $\bar{\eta}$ の変化を示している。興味あることに、没水深が大きい場合

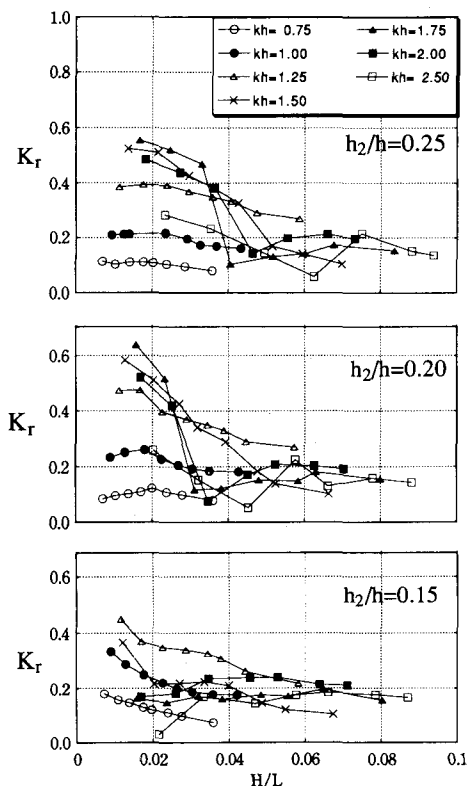


図-6 入射波の波形勾配に対する反射率の変化

($h_2/h=0.25$)には、波形勾配が小さい間は $\bar{\eta}$ は負の値を取る（下方に移動する）が、波高が増大するにつれて、上方へ移動するようになる。また、没水深によらず、波形勾配の増大とともに一旦極大値を取った後一定値に漸近する傾向を示し、この傾向は kh の値によらない。このような変動を生じる理由は、ポテンシャル理論における波力の定常成分と、渦と碎波の発生に起因して版に作用する波力の定常成分とが、入射波高の増大とともに相対的に変動することによって考えられる。変位量 $\bar{\eta}$ は、これらの力の定常成分と、フロート断面と変位量 $\bar{\eta}$ の積で与えられる浮力変化が等しくなる所に定まるわけで、フロートの水線面積を大きく取れば変位量 $\bar{\eta}$ は減少することになる（ただし、水平方向の投影面積は一般に大きくなるから、水平波力は増大することになる）。

3. あとがき

本研究で得られた結果を要約すると次のようである。入射波の波高がきわめて小さい場合は、完全流体の無渦運動を仮定した線形ポテンシャル理論で、定性的には推定が可能である。特に、水平版の動揺に関しては、理論解は有限振幅の波に対しても、実用上は十分な推定値を与える。しかし、入射波の波高が大きくなると、反射率

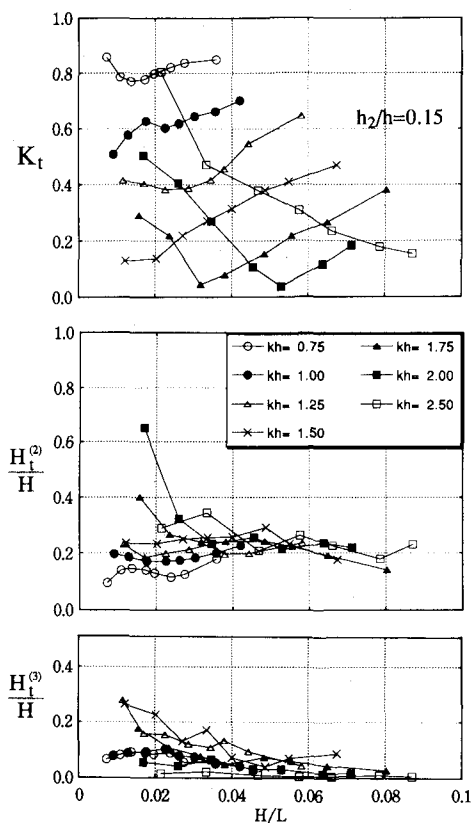


図-7 入射波の波形勾配に対する通過率と2倍および3倍周波数成分波の波高の変化

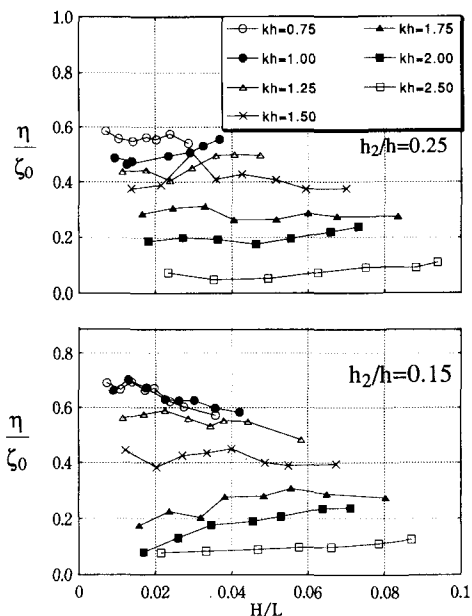
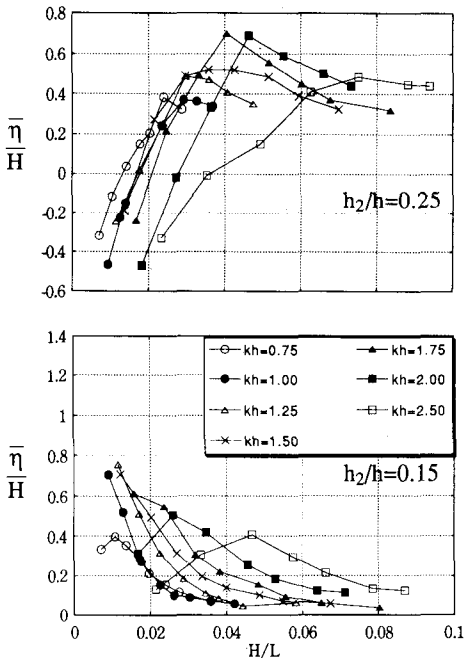


図-8 入射波の波形勾配に対する動揺振幅の変化



図一9 入射波の波形勾配に対する動揺中心の静止位置からの変位 $\bar{\eta}$ の変化

や通過率などの波浪制御効果に関しては、比較的小さな波形勾配の波であっても、線形理論による解は実際の現象と大きく異なる。

この原因は、水平版端部の渦や版上での砕波にともなうエネルギー損失の効果を無視していることによるもので、特に、水平版のような鉛直方向にきわめて鈍い物体が、水中で動揺をする場合には、版端部での渦の発生によるエネルギー損失はきわめて大きく、これを無視した完全流体としての解析は、実際の現象と大きく異なることを、本文の結果は示している。

なお、完全流体の無渦運動としての、波と水平版との非線形干渉も生じるが、これによって励起される高次の成分波に移行する入射波のエネルギーは、渦や砕波による損失エネルギーに較べて格段に小さい。しかも、入射波の波高が大きくなると、高次の成分波は入射波の波長によらず無視できるほど小さくなる。

以上のことから、二重管係留没水水平版の波浪制御効果を、理論解析によって究明するためには、線形理論に、水平版近傍での渦や砕波によるエネルギー損失の効果を

取り込むことが必須であり、完全流体としての高次のオーダーの非線形解析は、工学的な観点からは必ずしも必要がないように考えられる。

二重管係留没水水平版の着目点を再述すると、長周期の潮位変動に対しては自由に追従して版上水深を一定に保つことができ、しかも、波浪に対しては鉛直動揺をわずかに許容する（抵抗二重管を利用する）ことで、版に作用する鉛直波力を大きく減少しようとするものである。加えて、作用する水平波力が格段に小さいこと、流れを妨げないこと、景観を損なわないことなど、没水水平版形式の防波堤の利点として挙げられている点は損なわれることはない。

本文では、枚数の関係で示すことが出来なかったが、抵抗二重管を水平版に取り付けることによって、より長波長の波に対して波浪制御効果が得られることも確めている。今後は、抵抗二重管の効果も含めた、二重管係留没水水平版の波浪制御効果と動揺特性を、理論解析と実験により明らかにしていく予定である。

最後に、この研究をおこなうに当たっては、文部省科学研究費(一般研究(C))課題番号 04650466, 研究代表者: 吉田明德)の援助を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 今井貫爾・秋山義信・工藤君明・続辰之介 (1988): クレセント型没水水平版に働く波力特性に関する研究, 第35回海講演文集, pp. 522-526.
- 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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 529-533.
- 小島治幸・吉田明德・井島武士 (1991): 没水水平版と波との非線形干渉に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 556-560.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入射波・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, pp. 1-26.
- 高木幹雄・川崎孝生 (1988): 没水水平版の消波効果に関する研究, 第8回海洋工学シンポジウム論文集, pp. 259-266.
- 吉田明德・村上啓介・入江 功・志方洋介・中村哲也 (1991): 二重管式浮体係留システムの抵抗特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 791-795.
- 吉田明德・旭 剛志・小島治幸・中村哲也・入江 功 (1992): 二重管式浮体係留システムで係留された没水水平版による波の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 521-525.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 特性曲線を用いた没水水平版周辺の波浪場の非線形解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 524-528.