

粗な樹林密度で配置された円柱群に作用する波力と 消波機能に関する研究

林 建二郎*・藤井 優宏**・重村 利幸***・萩原 運弘****

1. 諸 言

護岸材料としては、コンクリートブロックや原石、アスファルト等が良く用いられている。しかし、これら材料を用いた護岸は、環境面や親水性において多くの問題が指摘されている。また、これら護岸からの波の反射率は大きく、反射波の船の航行や海岸構造物に対する影響も問題になっている。河岸や海岸・湖岸におけるこのような問題に対する対策として、ヨシ原等の水辺植生が持つ環境再生機能(堀江ら, 1987)や消波および浸食防止機能が再認識され、その積極的な保持・利用に対する検討がなされている。

しかし、水辺植生の生育・保持やその維持・管理法の検討において重要な植生の耐波特性や、植生が波浪エネルギーをどの程度まで反射・減衰させるかについては十分に明らかにされていない(浅野ら, 1991; Bouter, 1991; 福岡ら, 1992; 松田ら, 1997; 伊福, 1997; 林ら, 1999)。これら植生の水理問題の解明においては、植生域周りの流れや(田中ら, 1999)、植生に作用する流体力の特性(林ら, 1998a)を明らかにする必要がある。

反射波を抑えるとともに、越波および透過による港内透過波を許容最小限に抑え、かつ港内外の海水交換をさせるという利点から、透水性消波構造物の採用が計画・施工されている。その基礎的な研究として、円柱などの多柱杭を波の進行方向に複数列並べた複数列多柱杭構造物や様な透過性物体(捨石やブロック等)の波の反射率 K_r や透過率 K_t 、ならびに作用波力等の水理特性が調べられている(近藤ら, 1970; 榎木, 1991; 浦島, 1992)。

本研究は、波浪に対する水辺植生群の耐波特性および水辺植生群が有する波エネルギーの反射や減衰特性を明らかにすることを目的として、粗な樹林密度で配置された円柱群に作用する波力特性および波の反射・消波特性を水理模型実験により調べるとともに、植生群における波の透過率に関する評価式を検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験には長さ 40 m, 幅 0.8 m, 高さ 1 m の吸収造波式二次元造波水槽を用いた。実験装置の概略を図-1 に示す。外径 $D=1$ cm, 長さ 80 cm のステンレス円柱を水槽の一区間(長さ $B=1.8$ m)に図-2 に示すように千鳥配置で鉛直設置し円柱群とした。波による円柱の振動を抑えるために、円柱群の上端はベニヤ板で固定されている。

正三角形をなす各円柱の中心間隔は $S=10$ cm である(図-2 参照)。円柱群の樹林帯密度 λ (単位床面積に占める円柱群の断面積, $\lambda=\pi D^2/(2\sqrt{3}S^2)$) は 0.0091 である。河岸や湖岸に生育しているヨシ原群の樹林帯密度 λ は小さく、その最大値は 0.02 程度である。ヨシの茎径 D も細くその最大値は 1.5 cm 程度である。従って、本実験に用いた円柱群の λ および円柱径 D の値は、一般に生育しているヨシ群の代表値である。

円柱群による波の反射率 K_r (=反射波高 H_r /入射波高 H_i) と透過率 K_t (=透過波高 H_t /入射波高 H_i) を計測するために、容量線式波高計を円柱群の沖側と岸側に 2 本ずつ設置した。沖側の波高計 A と B および岸側の波高計

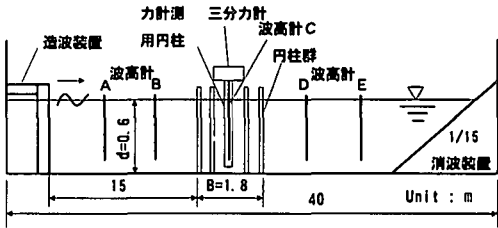


図-1 実験装置の概略

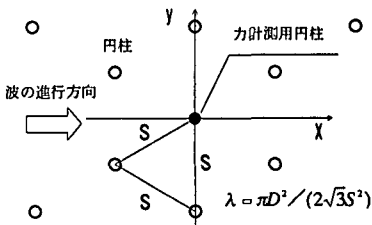


図-2 円柱群の配置間隔

* 正 会 員 Ph.D. 防衛大学校助教授 建設環境工学科
** 学生会員 防衛大学校理工学研究科
*** 正 会 員 Dr.E 防衛大学校教授 建設環境工学科
**** 正 会 員 工博 清水建設技術研究所環境技術開発部

DとEの間隔は、それぞれ作用波波長 L の $1/4$ とした。波高計A, Bより円柱群への入射波高 H_i と円柱群からの反射波高 H_r を、波高計D, Eより円柱群からの透過波高 H_t および岸側の消波斜面からの反射波高 H_r を、入・反射分離法を用いて算定した。

三分力計に外径 $D=1$ cm, 長さ80 cmのステンレス円柱を片持ち梁形式で鉛直に設置し、円柱群の中央に位置する円柱(力計測用円柱)1本に作用する波の進行方向波力 F_x を計測した。力計測用円柱の下端と水路床との間隔は1 mm以下とした。円柱群内における波浪条件を計測するために、力計測用円柱の真横に容量線式波高計Cを設置した。

実験水深は $d=60$ cmの一種類とした。使用した規則波の周期は $T=0.96, 1.6, 1.92, 2.56, 3.2$ 秒の5通り、波高の範囲は $H=1\sim 20$ cmとした。比較のために同円柱を単独に設置した場合(単独円柱)の F_x も同様に計測した。

3. 円柱群における波の透過率評価式

透過性構造物からの波の反射率 K_r と透過率 K_t に関しては、多くの評価式が得られている(近藤ら, 1983; 角野ら, 1983; 樫木ら, 1991)。河岸等に生育しているヨシ原群も透過性構造物の一つの形式と考えられる。ただし、ヨシ原群の樹林帯密度 λ は小さく、空隙率は非常に大きい。また、茎径 D は作用波の波長に比べて十分小さい。従って、ヨシ原群からの波の反射率 K_r は小さい(Bouter, 1991; 福岡ら, 1992; 林ら, 1999)。

ヨシ原群を簡単に模した円柱群においても λ が小さい場合、波の反射率 K_r は同様に非常に小さいと考えられる。従って、円柱群を透過する波(透過波)の波エネルギーは、入射波の波エネルギーから円柱群内での損失エネルギーを差し引いたものに等しい。この損失エネルギーは、円柱群を構成する各円柱からの後流渦に起因し、各円柱に作用する波力による仕事量に等しい(Dalrymple *et al.*, 1984; 水理公式集, 1999)。

円柱群内の一本円柱に作用する波の進行方向波力 F_x は、モリソン式で評価すると式(1)で示される。

$$F_x = \int_0^{d+\eta} \frac{\rho}{2} C_D u |u| D ds + \int_0^{d+\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中、 ρ は水の密度、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数である。 u および du/dt は波水粒子の水平速度成分と加速度である。 ds は円柱の微小部分長、 d は静水深、 η は波の水位変動量である。

円柱1本に作用する波力 F_x による単位時間当りの損失エネルギー(=仕事量) E_f は、式(2)で示される。

$$E_f = -\frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{d+\eta} \frac{\rho}{2} C_D u |u| D ds + \int_0^{d+\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} u ds dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

微小振幅波理論を適用すると、 E_f は式(3)で示される。

$$E_f = \rho C_D \frac{D}{T} \left(\frac{\pi H}{T \sinh kd} \right)^3 \cdot \left\{ \frac{1}{3} \sinh^3 kd + \sinh kd \right\} \frac{4}{3} \frac{1}{k\sigma} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2)の右辺の第2項の慣性力による影響は、微小振幅波を適用した結果、式(3)においては消えている。しかし、波の非線形性や円柱群からの反射波の影響(樹林帯密度 λ が大きな場合)が重要となる場合には、式(2)の第2項を考慮する必要がある。 $k=2\pi/L$, $\sigma=2\pi/T$ である。

水路単位幅断面を通して単位時間当たりに輸送される波エネルギー W は、式(4)で示される。

$$W = (1/8) \rho g H^2 C_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中、 $n=1/2 + kd/\sinh kd$, g は重力加速度、 H は波高、 C は波速(= L/T)である。

径 D の円柱が樹林帯密度 λ で配置されている円柱群において、波進行方向の単位長さ当たりに失われる水路単位幅当たりのエネルギー LE_f は式(5)で示される。

$$LE_f = \lambda E_f / (\pi D^2 / 4) \quad \dots\dots\dots (5)$$

波進行方向の微小区間 dx への入射波高を H_{ip} , dx からの透過波高を H_{tp} とすると、エネルギー釣り合い式として式(6)が得られる。

$$(1/8) \rho g (H_{ip}^2 - H_{tp}^2) C_n = LE_f dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(3)と式(5)を式(6)に代入し整理すると、微小区間 dx における透過率 K_{tp} は、式(7)で示される。

$$K_{tp} = H_{tp}/H_{ip} = [1 - (32/3) \lambda (H_{in}/D) \{ dx / (g T^2) \} \cdot (C_D/n) \{ 1/3 + (1/\sinh^2 kd) \}]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この H_{tp} を次の微小区間 dx への入射波高 H_{ip} とし、次の微小区間 dx での透過波高 H_{tp} を逐次求める。この逐次計算を円柱群間の全長で行うと、円柱群を透過する波の透過波高 H_t が求まり透過率 K_t を計算できる。

4. 結果および考察

4.1 単独円柱および群円柱における一本円柱の C_D , C_M

(2)式と(7)式で示されるように、円柱による損失エネルギーの算定においては、波動場に置かれた直円柱の抗力係数 C_D および質量力係数 C_M の正確な評価が重要である。振動流中に置かれた円柱の C_D , C_M は、Keulegan-Carpenter数(KC数)と β 値(= $Re/KC=D^2/(\nu T)$)で規定されることが明らかにされている(Sar-

pkaya, 1976, 図-3 参照). β 値は, Re 数 ($=U_m T/D$) と KC 数 ($=U_m T/D$) との比を示す周波数パラメーターである. U_m は水平水粒子速度 u の最大値, ν は流体の動粘性係数である.

しかし, 波動場における直円柱の C_D , C_M に対する KC 数や β 値の影響はまだ明確に把握されていない. その原因としては, 波動場における主流の水深方向変化や波水粒子速度の算定精度等が挙げられる. また, 茎径 D が波長 L に比べて非常に小さい, 植生のように β 値が小さい場合 ($\beta < 500$) の C_D , C_M については, 振動流場および

波動場のどちらのケースにおいても明らかにされていない.

波動場に単独に鉛直設置された円柱(単独円柱)の C_D , C_M の CKC 数に対する変化特性を β 値 ($=CKC/CKC$ 数) をパラメーターとして図-3 に示す(林, 村橋, 1998b). CKC 数, CKC 数は, 円柱の静水面位置における Re 数と KC 数である.

水深方向に一定と仮定した C_D および C_M の算定にはフーリエ解析を用いる方法を使用した. 水粒子速度 u および加速度 du/dt の算定には微小振幅波理論を用いた. また, 消波斜面からの反射波の影響を考慮するために, 波動場は進行波と消波斜面からの反射波の合成波場として取り扱った. このようにして計算された水粒子速度の算定値とレーザー流速計による実測値の一致度は良好であった. 図中には, 振動流場における C_D と C_M の結果 (Sarpkaya, 1976) を β 値をパラメーターとして実線で示す. 波動場では流れ場が水深方向変化する結果, 波動場と振動流場における C_D , C_M の完全な一致は認められないが, 両者の整合性は十分である. C_D は CKC 数が約 2 より約 12 までは, CKC 数の増加に伴い増加し, その後は, CKC 数の増加に伴い徐々に減少している.

今回の実験で得られた, 単独円柱および円柱群中の一本円柱の C_D および C_M の CKC 数に対する変化特性を水深波長比 d/L および β 値をパラメーターとして図-4 に示す. 円柱径 D は波長に比べて十分小さいため, β 値は 30~80 と大変小さい. 本実験では高い KC 数領域での計測に重点を置いている結果, 低い KC 数領域での C_D , C_M の解析精度は低い. また, KC 数が高い領域では, 慣性力項に比べて抗力項が卓越する結果, C_M の解析精度は C_D に比べて低い.

単独円柱と円柱群中の一本円柱の C_D , C_M の比較にお

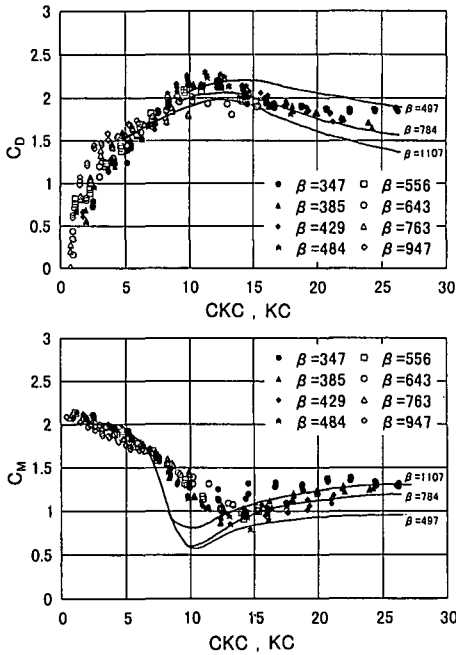


図-3 単独円柱の C_D , C_M と CKC の関係 ($350 < \beta < 950$)

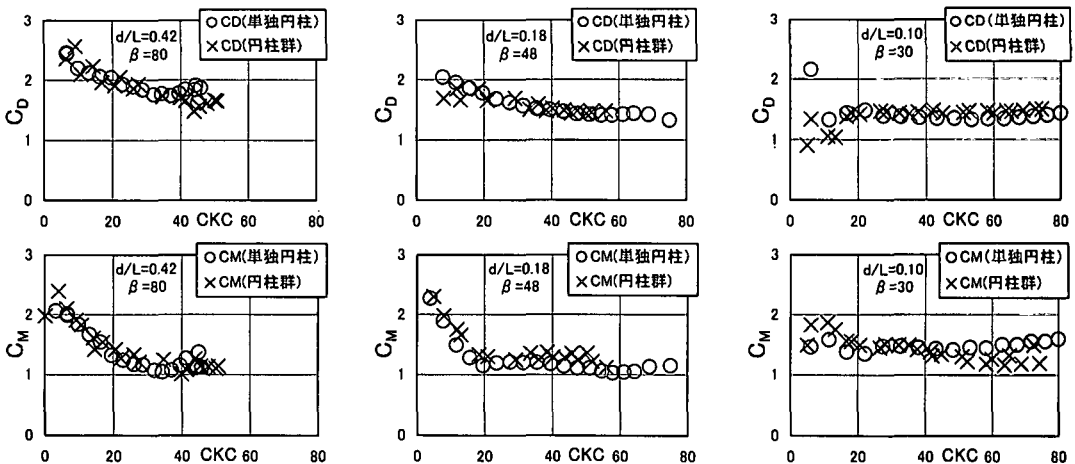


図-4 単独円柱および円柱群中における 1 本円柱の C_D , C_M と CKC 数の関係

いては、明確な差は認められない。これは、本実験においては、円柱間隔 S が円柱径 D の 10 倍と十分に広いためと思われる（図-2 参照）。池田ら（1984）は、振動流中に設置された 2 本の円柱間隔が円柱径 D の 7 倍程度離れたと、2 円柱の間には干渉がなくなる結果を報告している。

4.2 円柱群からの波の反射率

円柱群の沖側と岸側に生じる反射波の反射率 K_r の波形勾配 H_i/L (H_i : 入射波高) に対する変化特性を、水深波長比 d/L をパラメーターとして図-5 に示す。沖側（円柱群前）での反射率 K_r は、 K_r =円柱群からの反射波高/円柱群への入射波高 H_i 、岸側（円柱群後）での反射率 K_r は、 K_r =消波斜面からの反射波高/円柱群からの透過波高 H_t である。樹林帯密度が $\lambda=0.0091$ と小さいため、本円柱群からの反射率は $K_r<0.1$ と非常に小さい。緩やかな斜面勾配 (=1/15) を有する消波斜面からの反射率 (= 岸側での反射率) も $K_r<0.1$ と非常に小さい。

4.3 円柱群における波の透過率

円柱群からの透過率 K_t の波形勾配 H_i/L に対する変化特性を、水深波長比 d/L および B/L (B : 円柱群の長さ) をパラメーターとして図-6 に○印で示す。 K_t は、 H_i/L の増加および d/L の減少に伴い小さくなっている。 H_i/L の小さい領域における実験値 K_t の散らばりは、小さな計測波高に起因する計測誤差の影響と思われる。

それぞれの図中に示す 3 種類の実線は、(7) 式中の抗力係数を $C_D=1$, $C_D=1.5$, $C_D=2$ と変化させて算定した透過率 K_t の逐次計算結果である。実験値と計算値との比較より、 $d/L=0.42$ の場合の抗力係数は $C_D=1.5\sim 2$ 、 $d/L=0.18$ の場合の抗力係数は C_D は約 1.5、 $d/L=0.14$ の場合の抗力係数は $C_D=1\sim 1.5$ 、 $d/L=0.103$ の場合の抗力係数は $C_D=1\sim 1.5$ と推定される。これら C_D の各推定値は、図-4 に示される円柱群中の 1 本円柱の C_D の実測値と概ね一致している。

4.4 実ヨシ原群における波の透過率の評価

福岡ら（1992）は、荒川の河口において河岸の幅約 30 m にわたって群生しているヨシ原群が、船の造る波をどの程度まで反射し減衰させるかを船の走行試験を行って調べた。ヨシ原には、高さ=3 m 程度、直径=0.5~0.8 cm のヨシが 160~240 本/ m^2 の密度で生えている。ヨシ原前面の水深は 50~80 cm 程度であり、岸方向に少しずつ浅くなっている。ヨシ原群における平均水深は 40 cm 程度と推測される。観測が行なわれた時期は 9 月である。

ボートの造る波の周期は $T=2.1\sim 2.9$ 秒であり、ヨシ原前面での波高は $H=13\sim 23$ cm、波長は $L=6\sim 8$ m 程度であった。従って、入射波の水深波長比は $d/L=0.07\sim 0.1$ 、波形勾配は $C/L=0.02\sim 0.04$ の範囲であった。これら波に対するヨシ原群による反射率は $K_r=$

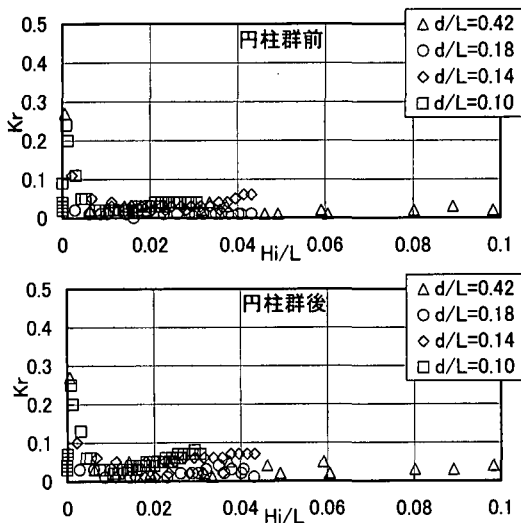


図-5 円柱群前後における反射率 K_r

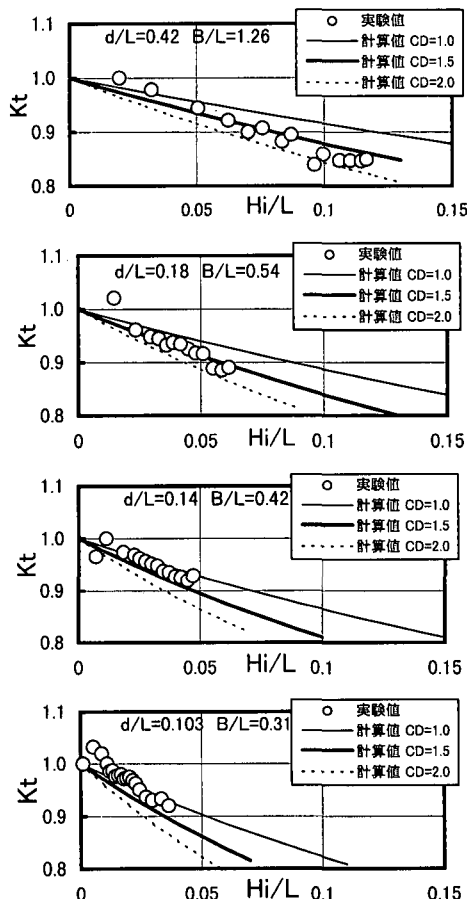


図-6 円柱群からの透過率 K_t

0.05~0.15 と非常に小さいものであった。一方、波がヨシ原を約 8 m 通過すると、波エネルギーの損失率は

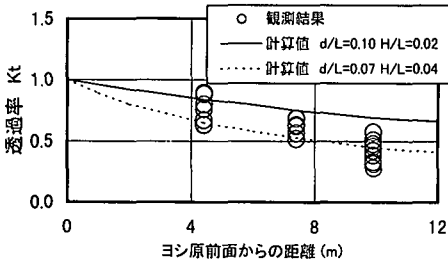


図-7 実ヨシ原群における透過率の評価

60~80%にも達していた。反射率が小さいので、この場合における波エネルギー損失の大部分は、ヨシ原内で生じていると考えられる。

このヨシ原群を構成するヨシ一本の平均茎径を $D=0.65$ cm, 単位面積当たりの平均本数を 200 本/ m^2 とすると、樹林帯密度は $\lambda=0.007$ である。図-7に、ヨシ原前面から岸側へ 4.4 m, 7.4 m, 9.9 m の地点での透過率 K_t を○印で示す。これら K_t は、筆者らがエネルギー損失率(福岡ら, 1992) から推算した結果である。

図中には、式(7)に上記の平均茎径、平均樹林帯密度、ならびに平均水深を代入して得られた透過率の推定値を実線および破線で示す。但し、式(7)中の C_D 値には、今回行った波力計測結果より推定した $C_D=1.5$ を用いた(図-4参照)。実線は、入射波の周期が $T=2.1$ 秒、水深波長比が $d/L=0.10$ 、波形勾配が $H/L=0.02$ の場合である。破線は、 $T=2.9$ 秒、 $d/L=0.07$ 、 $H/L=0.04$ の場合である。各観測値毎の波形勾配を認識できないため詳細な比較はできないが、 $C_D=1.5$ を用いた式(7)による計算値は観測値(○印)を概ね評価している。

しかし、本解析においては、実際のヨシ原群における河岸の水深変化や波に対するヨシの揺動等の影響は考慮されていない。本評価方法においては、水粒子速度と揺動する植生との相対速度を(2)式の u に用いれば、揺動の影響を考慮できる。しかし、植生の揺動特性や揺動時の植生に作用する波力特性については、まだ不明な点が多い。植生の揺動を考慮すると、植生による波高減衰率は低下する解析結果が報告されている(浅野ら, 1991)。また、波形勾配が大きくなると、揺動量の増加により、波動エネルギーが植生層で発生する乱れエネルギーに転換する割合が増大する結果も報告されている(田中ら, 1999)。

5. 結 言

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) ヨシ茎のように、 β 値が小さい円柱に作用する波力の抗力係数 C_D および質量係数 C_M の KC 数に対す

る変化特性を調べた。

(2) ヨシ原群のように樹林帯密度 λ が小さい円柱群からの波の反射率 K_r は、小さいことを確認した。

(3) 樹林帯密度 λ が小さい円柱群中における波の損失エネルギーを、円柱群中の一本円柱に作用する波力計測より精度良く評価した結果、円柱群を透過する波の透過率 K_t を正確に評価することができた。

最後に、本研究の室内模型実験およびデータ解析においては、本校の大江敦子学生に熱心な協力を頂いた。ここに記し、厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 浅野敏之・出口 浩・間瀬 肇・小林信久 (1991): 動揺する海藻群落上を伝搬する波の特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 26-30.
- 池田良穂・堀江 裕・田中紀男 (1984): 振動する複数円柱に働く粘性流体力の相互干渉について, 関西造船協会誌, 第198号, pp. 79-87.
- 伊福 誠 (1997): 人工海藻による波・流れの制御と漂砂, 海岸工学論文集, 第44巻(1), pp. 536-540.
- 浦島三朗 (1992): 円柱杭型消波構造物の反射率及び透過率について, 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第27号, pp. 91-97.
- 角野昇八・小田一紀・伊庭智生 (1983): 細い多柱構造からの波の反射と透過現象の境界値問題解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 395-399.
- 樺木 亮(編) (1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, 482 p.
- 水理公式集「平成11年度版」(1999): 土木学会, pp. 474-476.
- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, pp. 70-99.
- 田中厚至・長岡 裕・原 恒司 (1999): 往復流下における柔軟な植生周りの流に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 806-810.
- 林建二郎・萩原運弘・上原正一・藤間功司・重村利率 (1998a): 水辺植生の水理特性について, 海岸工学論文集, 第44巻(1), pp. 536-540.
- 林建二郎・村橋崇光 (1998b): 防衛施設庁研修成果報告, 65 p.
- 林建二郎・木村保夫・鈴木正幸・萩原運弘・重村利率 (1999): 湖沼における植生護岸の形成とその効果, 海岸工学論文集, 第44巻(2), pp. 1116-1120.
- 福岡捷二・甲村謙友・渡辺明英・三浦央昭 (1992): 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第36巻, pp. 713-716.
- 堀江 毅・細川恭史・三好英一・関根好幸 (1987): 植物体(ヨシ)による浄化能力の検討, 港湾技術研資料, No. 591, 18 p.
- 松田義弘(編) (1998): 熱帯マングローブ生態系を維持する物質分散機構の解明(研究課題番号08680559), 平成8~9年度科学研究費補助金(基盤研究(C))研究成果報告書, 89 p.
- Bouter, E. E. (1991): Wave damping by reed, P.I.A.N.C.・A.I.P.C.N., Bulletin 1991, No. 75, pp. 56-63.
- Dalrymple, R. A., J. Kirby and P. Hwang (1984): Wave diffraction due to area of energy dissipation, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 110, No. 1, pp. 67-79.
- Sarpkaya, T. (1976): Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders, BOSS-76, Vol. 1, pp. 220-235.