

斜面型直立消波堤の波力特性および消波効果に関する研究

榊原敏行*・道下 勲**・清水虎重***

1. ま え が き

近年、海洋空間の有効利用が叫ばれ、沖合人工島構想が発表されるなど、大水深域における経済的な防波構造物への要請が高まりつつある。一方、消波機能を有する防波堤や護岸等の新しい形式としてケーソンタイプの直立消波堤が提案され、水深が比較的浅く波浪が穏やかな場所に適用されてきているが、この構造形式は耐波力特性においても従来の直立堤に比べて優れた点を有し、上記要請に答えられる可能性が高い。しかし、大水深直立消波堤としては、曲面スリット堤、二重横スリット堤等が発表されているものの数は少ない。本稿は、外洋の大水深港湾を対象とした経済的な防波構造物の開発を目的として、図-1 に示すような遊水室に斜面を有する直立消波堤である「斜面型直立消波堤」を取りあげ、長周期波に対する波力特性および消波効果を水理模型実験により検討した結果を報告するものである。

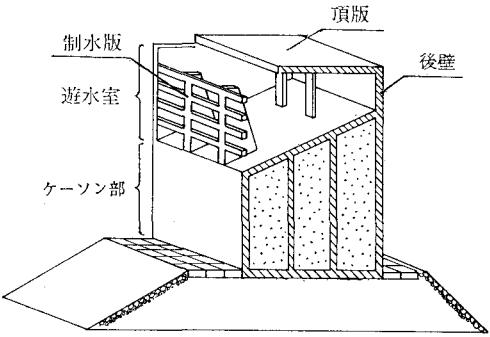


図-1 斜面型直立消波堤

2. 実験方法

実験に使用した水槽は、幅 5m、長さ 34m、高さ 1.2m の不規則波造波水槽であれ、直角入射の場合は観測窓側を 0.6m 幅で仕切った二次元水路として、斜め入射の場合は隔壁なしで用いた。

造波機の駆動形式は油圧サーボ式、造波型式はピストン型である。

造波機の造波能力は周期 0.3~4.0sec、波高の最大値は 30cm である。不規則波の発生波形は任意であるが、実験には有義波の諸元が決まるとスペクトル形状が決定するプレットシュナイダー・光易型スペクトルを用いた。

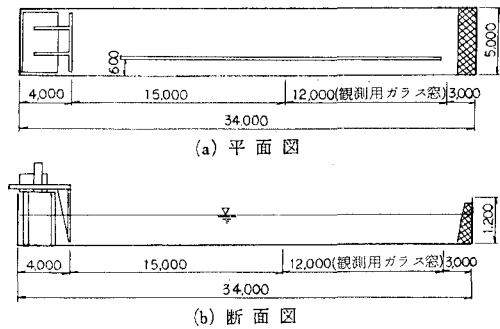


図-2 造波水槽 (単位 mm)

実験に用いた模型は縮尺 1/50 で図-3 に示すように堤体全幅におよぶ遊水室が形成され、しかも遊水室は斜面を有しているのが特徴である。

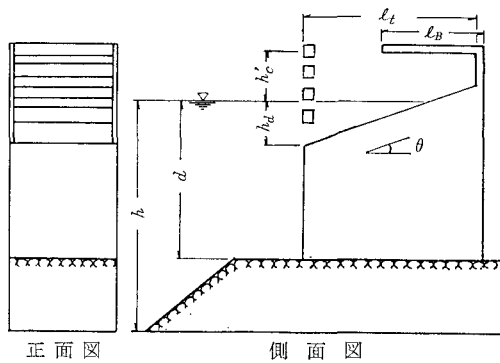


図-3 実験に用いた模型諸元

実験では、波浪条件による滑动時期等の滑动メカニズムの把握、斜面型直立消波堤の構成要素である制水版開口率 (ϵ)、斜面傾斜角 (θ)、斜面下端水深 (h_d)、頂版 (L_R) 幅の違いが波力に及ぼす影響およびマウンド高 (d/h) による衝撃砕波力の発生について検討した。なお制水版開口率 (ϵ) は以下のように定義した。

* 正会員 五洋建設株式会社土木設計部 第二課
** 正会員 五洋建設株式会社技術研究所 水理水工研究室
*** 正会員 五洋建設株式会社技術研究所 水理水工研究室

$$\varepsilon = \frac{\text{前面開口部の面積}}{\text{遊水室前面の面積 } (h_d + h_e)}$$

堤体に作用する波力の評価に際しては、波の条件を一定にしておき、堤体重量を除くに変化させた時の滑動限界重量 (W_{0c}) を用いた。この場合、波力は (1) 式で算定される。滑動限界重量は中村ら¹⁾の実験方法を参考に堤体滑動量が 0.2mm/波 (現地で 1.0cm/波) 以内の時の堤体水中重量とした。

$$P_E = \mu W_{0c} / 1 + \mu \frac{U_G}{P_G} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_E : 水平波力、 μ : 摩擦係数、 U_G : 合田式²⁾による揚圧力、 P_G : 合田式²⁾による水平波力である。

反射率の算定には合田ら²⁾による入・反射波分離方法を用いた。これは2点で同時に計測された水位記録をFFT法により有限フーリエ級数で表示し、両者のパワースペクトルに基づいて各周波数成分に対し入・反射波を分離推定するものである。反射率は、入・反射波の総エネルギーをそれぞれ E_I , E_R として、(2) 式により定義した。

$$K_R = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、この方法では測定間隔 Δt によって分離可能な周波数域が限定されるので、エネルギーは有効周波数域に対してのみ計算する。本実験では、水深 $h=80.6$ cm、周期 $T=0.85 \sim 2.26$ sec に対し、 Δt を 10~20 cm 間で設定した。また、測定波数は規則波の直角入射波で8波、斜め入射波で4波とし、1波を32分割してデータ総数 256 または 128 を対象に解析を行った。不規則波の場合、データ前後の不連続性が解析精度に及ぼす影響が大きくなることや、統計量を満足させる解析波数を多くとる必要があり、サンプリング周波数を 8.33 Hz、データ総数を 512 としてスペクトル解析を行った。

3. 波力特性

(1) 堤体の滑動時期と部材に作用する波圧

斜面型直立消波堤が滑動する状況を堤体前面水位、制水版前面波圧、底面および頂版の揚圧力の経時変化で整理すると2つのタイプに分類できる。

(a) 直立混成堤と同様、堤体の滑動時期は前面水位がピークとなる付近である。この場合、制水版前面波圧、底面の揚圧力はピークとなるが、遊水室の水位は上昇途上にあり、頂版、後壁には波圧は作用しない。

(b) 入射波が遊水室に飛び込み、遊水室からあふれ出て頂版を越えようとする時滑動が生ずる。この場合、前面水位はピークを過ぎているが、遊水室に作用する波力は最大である。

このような滑動のメカニズムの相違を堤体各部に取付けた波圧計の出力波形の経時変化および直立消波堤前面

の水面形状の比較により示したものが図-4である。波圧波形の経過時間を示す直線 ①, ②, ③ は、水面形状線 ①, ②, ③ に対応している。

図-4 (a) は短周期である $T=12.0$ sec, $H=8.7$ m に対する測定結果、図-4 (b) は長周期で大波高である $T=16.0$ sec, $H=14.7$ m に対する測定結果である。

堤体安定性の確保は短周期の波に対しては制水版開口率の調整である程度可能であるが、長周期で大波高の場合は制水版開口率のみならず、頂版高、頂版幅、遊水室幅が堤体の安定性に影響しており、これらを適切に設定することが必要となる。また、遊水室の上部開口部にスリットを設けたり、頂版幅を長くして遊水室に飛び込む水量を制限する方法も波力の低減に効果があった。

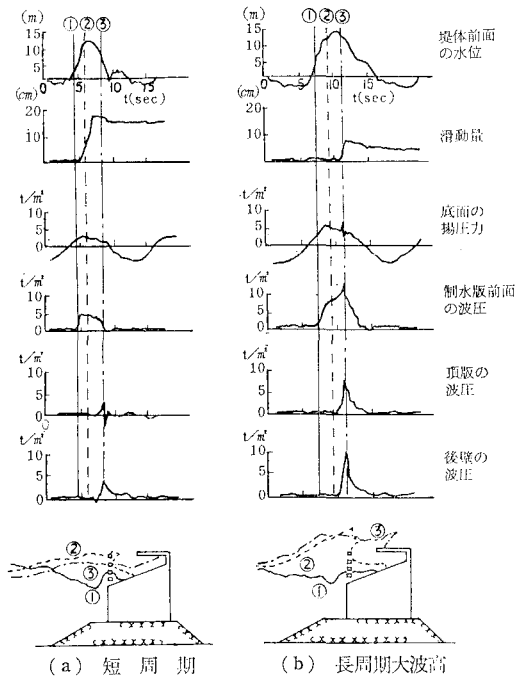


図-4 堤体の滑動前後における波の作用状況

(2) 制水版開口率 (ε) の影響

図-5 は制水版開口率 (ε) が波力に及ぼす影響を示したものである。比較的小波高の場合 ε の増加により波力係数 ($\bar{p}/w_0H$) は減少しているが、大波高の場合は $\bar{p}/w_0H$ はあまり変化していない。小波高の場合は開口面積の増加が波圧の受圧面積の減少につながり波力が小さくなるが、大波高の場合は上部開口部から飛び込む水塊により遊水室に働く波力が支配的となり、 ε の影響は小さく考えられる。最適な制水版開口率は、長周期 ($T=16.0$ sec) の波に対して安定性が最もよい $\varepsilon=45\%$ が適当と考えられる。

(3) 斜面傾斜角 (θ) の影響

図-6 は斜面傾斜角 (θ) を 10° , 20° , 30° と変化さ

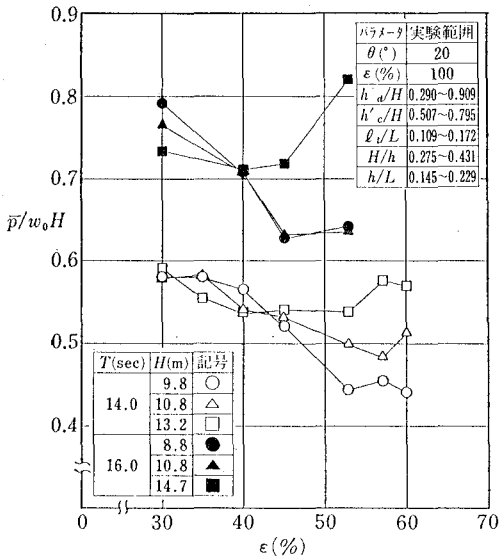


図-5 制水版開口率 (ϵ) と波力係数の関係

せた場合の波力の変化を示すものである。ただし、斜面傾斜角の変化に伴ない斜面下端水深 (h_a) も変化する点に注意を要する。全体の傾向から判断すると、堤体の安定性は $10^{\circ} \sim 20^{\circ} > 30^{\circ}$ の順となる。最適値は消波効果の結果も考慮して $\theta = 20^{\circ}$ とした。

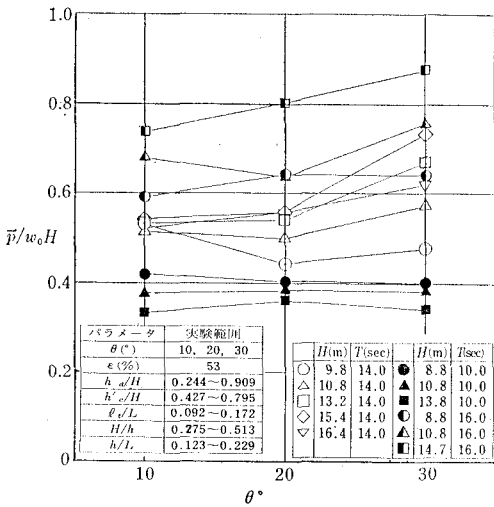


図-6 斜面傾斜角 (θ) と波力係数

(4) 斜面下端水深 (h_a) の影響

図-7 は斜面下端水深 (h_a) を 4.0m, 6.0m, 8.0m と変化した場合の波力の変化を示すものである。ただし制水版開口率はすべて 100% である。短周期 ($T=10.0\text{sec}$) の場合に比べ長周期 ($T=14.0\text{sec}$) の場合は頂版に作用する波圧が大きくなるため、 h_a の最適値が明確でない。全体の傾向からは、斜面下端水深は $1/2H$ とするのが適当と考えられる。

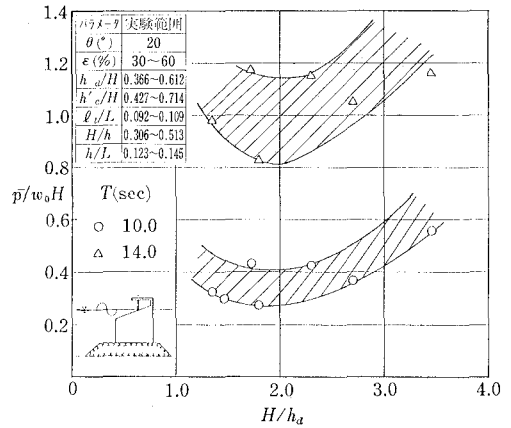


図-7 波高-斜面下端水深比と波力係数の関係

(5) 頂版幅 (l_B) の影響

図-8 は頂版幅 (l_B) と遊水室幅 (l_t) の比 (l_B/l_t) を 0.41, 0.58, 0.75 の 3 種類変化させた場合の波力の変化を示すものである。短周期 ($T=10.0\text{sec}$) の波および長周期 ($T=14.0\text{sec}$, 16.0sec) の波でも波高の小さな波に対しては l_B/l_t による $\bar{p}/w_0H$ の変化はあまり認められないが、長周期で大波高の波に対しては l_B/l_t が小さくなるほど $\bar{p}/w_0H$ が増大している。すなわち、短周期の場合は堤体前面の波力が支配的であるため l_B の影響が小さいが、長周期で大波高の場合は l_B/l_t が小さくなるほど遊水室に飛び込む水量が増大し波力が大きくなる。全体的な傾向から、頂版幅は $0.6l_t$ 程度とするの適当と考えられる。

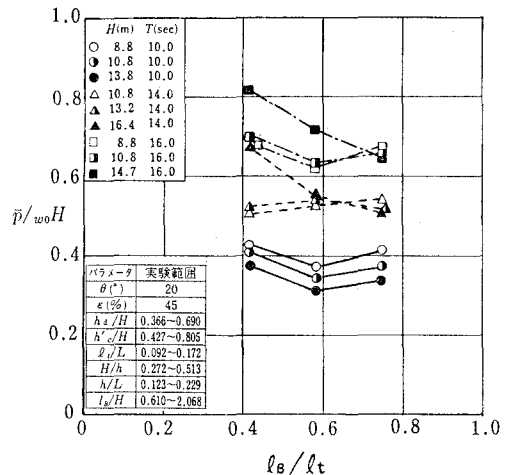


図-8 頂版幅-遊水室幅比と波力係数の関係

(6) マウンド高 (d/h) の影響

図-9 はマウンド水深 (d) を 10.5m, 15.0m, 19.5m, 24.0m の 4 種類変化させた時の波力の変化を示すものである。 $\bar{p}/w_0H$ は d/h が小さくなるほど、すなわち高マウンドになるほど増大している。しかしその最大値

は、1.2 以下であり、直立堤成堤に生ずるような高マウンドによる衝撃砕波力 ($\bar{p}/w_0H \geq 2.0$) の発生は見られず、高マウンドにおいても良好な波力特性を示している。

全体的な傾向から d/h が約 0.5 以上あれば $\bar{p}/w_0H$ はあまり増大しないことがわかる。

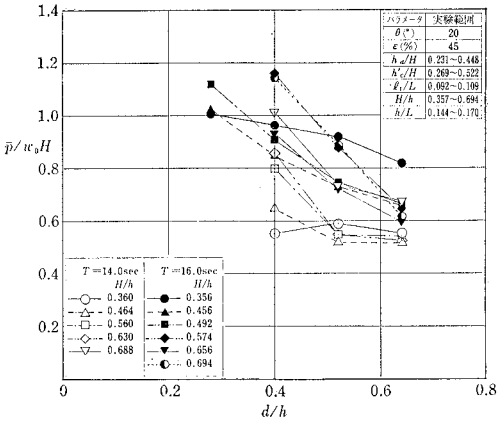


図9 マウンド水深-水深比と波力係数の関係

4. 消波効果

(1) 遊水室幅 (l_i) の影響

図-10 は直角入射波に対する遊水室幅 (l_i) と反射率の関係を示したものである。反射率は通常の直立消波堤と同様 l_i/L により変化するがその傾向は異なり、最小

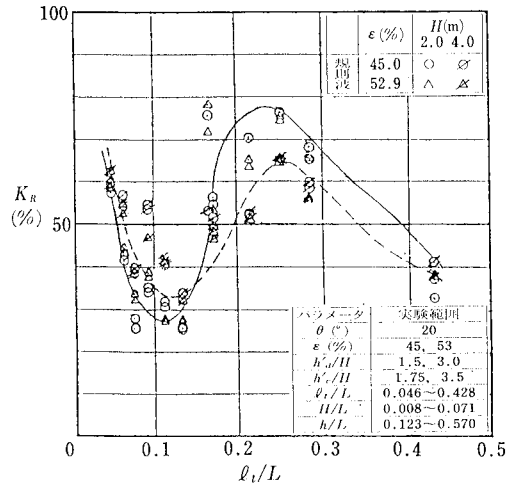


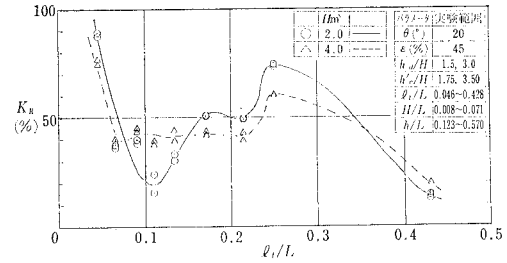
図-10 遊水室幅-波長比と反射率の関係(直角入射)

反射率は $l_i/L \approx 0.1$ の時 $K_R = 30\%$ 程度、最大反射率は $l_i/L \approx 0.25$ の時 $K_R = 70\%$ 程度である。また、 l_i/L が 0.1 より小さくなると K_R は増大傾向を示す。

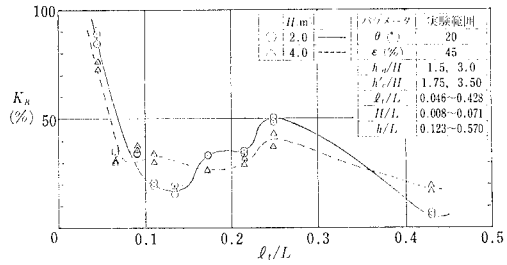
(2) 斜め入射の影響

図-11 は堤体直角方向から測った波の入射角 (β) 度

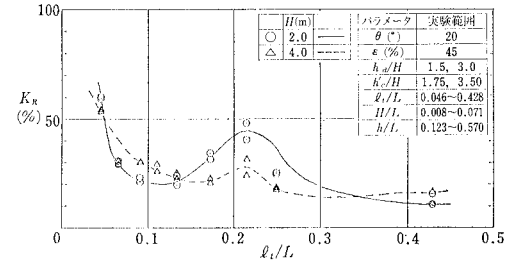
別に遊水室幅 (l_i) と反射率 (K_R) の関係を示したものである。波の入射角度が大きくなると K_R は低下する様子が見られる。これは、入射角度が大きくなると見掛けの遊水室幅が大きくなったり、側壁による2次反射波が増すためと考えられる。また反射率は直角入射の場合と同様、遊水室幅の影響が支配的であり、 $l_i/L \approx 0.1$ 付近で最小となっている。 l_i/L が 0.1 以下で K_R が増大傾向となること、 $l_i = 0.2 \sim 0.25$ で K_R のピーク値が見られることも直角入射の場合と同じ傾向にある。



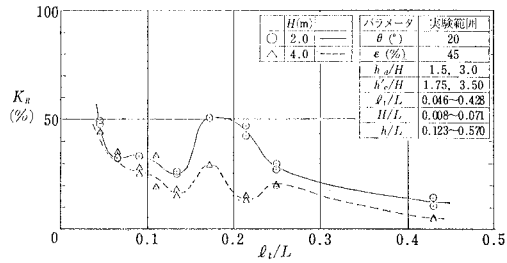
(a) $\beta = 15^\circ$



(b) $\beta = 30^\circ$



(c) $\beta = 45^\circ$

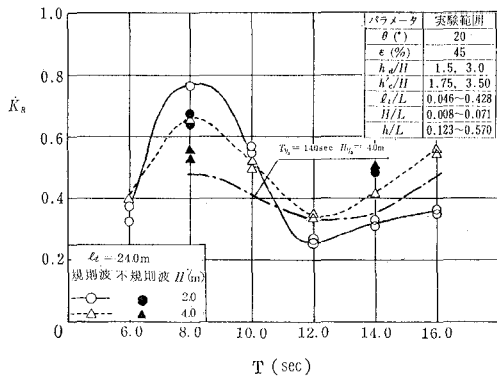


(d) $\beta = 60^\circ$

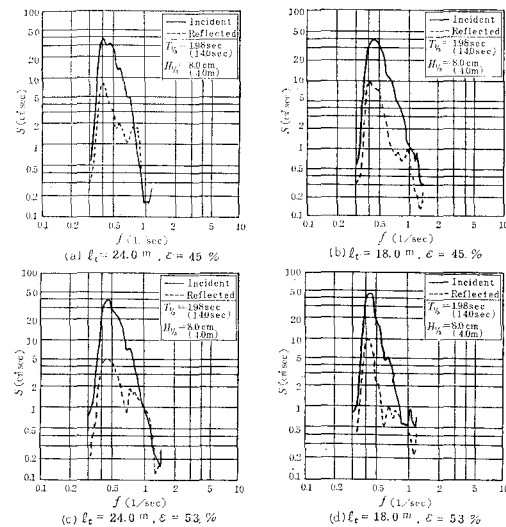
図-11 遊水室幅-波長比と反射率の関係(斜め入射)

(3) 規則波と不規則波に対する消波効果の比較

図—12 は周期の変化に伴う反射率の変化を示したものである。規則波による反射率は短周期波で大きく、長周期波に対して比較的小さくなっており、反射率の周期特性が顕著に表われている。不規則波の成分波ごとの反射率は図—13 (a) に示す入・反射波スペクトル図より求めたもので、各代表周期間の反射率の変動は比較的小さくならされた形になっているが、単一規則波に対する反射率と同様の傾向を示した。図—13 (a) と (b)、(c) と (d) から、入射波スペクトルは同一であるが、遊水室幅が小さくなると高周波数側の反射波エネルギー



図—12 規則波と不規則波の消波効果の比較



図—13 入・反射波スペクトル

が小さくなっており、短周期の波に対する消波効果がよくなることを示している。また、図—13 (a) と (c)、(b) と (d) の入・反射波スペクトル形状はほぼ同一であり、制水版開口率 ($\epsilon=45\%$, 53%) の違いによる消波特性の違いはなく、規則波と同様の傾向を示した。

5. あとがき

斜面型直立消波堤の主要な特性をまとめると以下のとおりである。

(1) 短周期の場合、堤体の安定性の確保は制水版開口率の調整で可能であるが、長周期で大波高の場合、制水版開口率のみならず頂版に作用する揚圧力、後壁に作用する波力が安定性に影響する。長周期で大波高の場合制水版開口率 (ϵ) を 45% 、頂版幅 (l_B) を $0.6l_t$ 程度に設定することにより波力は直立混成堤に比べて $1\sim2$ 割低減される。

(2) マウンド高 (d/h) を変化させた場合、波力係数 ($\bar{p}/w_0H$) は最大でも 1.2 程度であり、高マウンドによる衝撃砕波力の発生は認められず安定性は良好である。

(3) 反射率は遊水室幅により変化するが、最小反射率は $l_t/L=0.1$ の時 $K_R=30\%$ 程度であり良好な値を示した。

(4) 斜め入射波に対する反射率は、直角入射波 ($\beta=0^\circ$) に比べて入射角が増大するに従って低下する傾向を示す。

(5) 不規則波に対する入・反射波のエネルギー差は低周波数側では大きく高周波数側では小さくなっており単一規則波に対する反射率と同様の傾向を示した。

参考文献

- 中村竜二・守田照明・柳島慎一・田川昌宏：大水深防波堤に作用する波力について，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 328～332, 1978.
- 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技研資料，No. 246, 1978.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248, 1978.
- 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979.
- 村田 繁・山本修司・今野 茂・木村岩男・岩淵榮一：横スリットケーソンに作用する波力機構について，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 404～408, 1982.