

急勾配海岸における後部パラペット型上部斜面堤の 実用的な設計法について

岡部成光*・畑元浩樹*・白石貴司*
柳山 勉**・清水琢三***・片山裕之****

1. ま え が き

臨海部に立地される火力・原子力発電所は、立地条件の制約上、これまでに経験のない厳しい海象条件の地点を対象としなければならない場合が考えられる。例えば、急勾配海岸で高波浪が来襲する海域に防波堤を設置した場合、衝撃砕波力が発生する可能性が高く、防波堤の安定性を確保するためには、これをいかに回避するかが課題となる。

著者は、衝撃砕波力を回避する方策として、パラベットを後退させ、静水位近傍から上部工を斜面にした後部パラベット型上部斜面堤を提案し、その有用性を水理模型実験により確認した(田崎ら, 1995)。

本研究では、種々の条件で行った水理模型実験による波力、滑動量のデータを基に、後部パラペット型上部斜面堤に作用する波力特性を詳細に調べ、現行の設計法である合田式をベースとした実用的な設計法の確立を試みた。

2. 水理模型実験の概要

水理模型実験は、後部パラペット型上部斜面堤および比較のために現行の設計基準で設計した直立堤、上部斜面堤に対して実施した(田崎ら, 1995)。

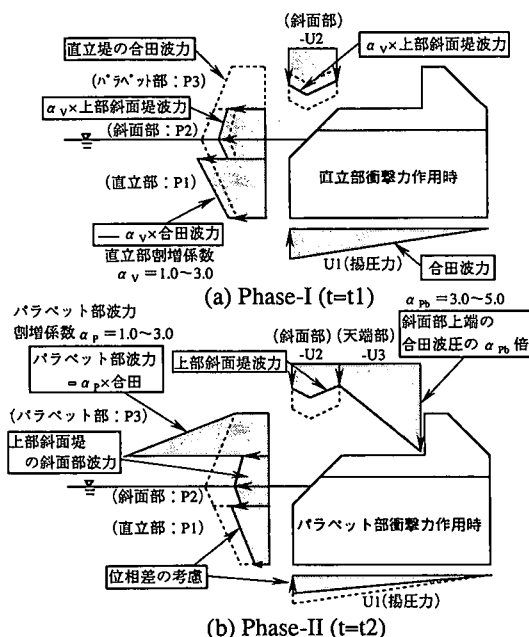
実験条件は、海底勾配 1/10, 1/20, 防波堤設置水深 D.L-10 m, D.L-20 m, 潮位 D.L+2.4 m(H.W.L.), D.L+0.0 m (L.W.L.) とした。波浪条件は設計沖波 $H_0=15.5$ m, $T_0=15.8$ s を想定し、沖波波高の 0.6~1.2 倍, 周期 14~18 s の条件で後部パラベット型上部斜面堤 109 ケース, 直立堤 47 ケース, 上部斜面堤 37 ケースの合計 193 ケース行っている。その内, 今回の検討では 121 ケースを対象とした。

波圧、滑動量はサンプリング周波数 1000 Hz で収録されており、直立部、斜面部、パラペット部の各部に作用する波力を時系列データとして算出した。

3. 後部パラペット型上部斜面堤の設計法の概要

後部パラペット型上部斜面堤に作用する波力について詳細に調べた結果、波力が直立部に作用する Phase-I ($t=t_1$) とパラペット部に作用する Phase-II ($t=t_2$) に分類され、この二つの Phase は同時に起こらないことが確認できた。したがって、それぞれの Phase について図-1 に示すような現行の設計基準である合田波力 (高橋ら (1992) の衝撃砕波力係数 α_1 を考慮) をベースとした設計波力の定式化を試みた。

Phase-I では、直立部と斜面部に作用する衝撃碎波力は有効波力ベースで合田波力の1～3倍になるが、パラペット部には作用しない。したがって、Phase-I では直立部と斜面部に作用する波力について考えればよい。実験波力を調べた結果、直立部波力 P_1 と斜面部波力 P_2 のピークには有意な位相差が見られなかったが、斜面部波力は堤体前面での長周期水位変動の関係で作用する場合としない場合があった。しかしながら、本研究では直立



図一1 後部パラペット型上部斜面堤の設計波力の模式図

- ・正会員 工修 九州電力(株) 土木部
- ・正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部
- ・正会員 工修 五洋建設(株) 企画部
- ・正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所

部と斜面部に同時に作用するものと考え、合力として評価することにした。

Phase-IIでは、パラペット部には作用する衝撃砕波力は有効波力ベースで合田波力の1～3倍になる。しかし波が直立部からパラペットに作用するまでの位相差が存在するため、直立部波力および揚圧力は合田波力より低減する。またパラペットに波が作用する時刻には上部工天端には鉛直下向きに作用する力が働くことが分かった。Phase-IIの場合に、水平波力が合力として最大になるケースでも、ロッキングは生じるものの、この鉛直下向き波力により有意な滑動は生じなかった。このことから、堤体の滑動安定性を評価する際には上部工天端に作用する鉛直下向きの波力を考慮する必要があることがわかった。

4. 衝撃波力から有効波力への換算

4.1 有効波力評価法の概要

衝撃砕波力は通常の設計波力の数倍に達することがあるが、捨石マウンドや地盤の弾性変形によってその一部が吸収される。したがって、実際に堤体の滑動に寄与する波力(有効波力)を評価する必要がある。本研究では、連成ばねモデル(Goda, 1994)を用い、衝撃波力から有効波力への換算を行った。

有効波力への換算は、衝撃波力時系列を入力として1波毎に行った。ばね定数は、堤体の変位波形と、衝撃波力作用時における変位の振動波形が合うように設定した。ただし、滑動量まで表すことができないため、変位の1波目の振動周期のみ合うように設定して応答計算を行った。有効波力としては、計算された波力時系列のピーク値を採用した。

4.2 有効波力の妥当性の検証

図-2に、直立堤および後部パラペット上部斜面堤(Phase-I, II)について、衝撃波力、および換算された有効波力を用いて算出した滑動安全率と1波の滑動量の関係を示す。有効波力に換算した場合には滑動安全率が1.0より大きいところでは滑動は見られず、1.0を下回る

と1波の滑動量が大きくなる傾向があり、滑動量の大きい直立堤でより顕著である。後部パラペット型上部斜面堤でもPhase-Iでこの傾向がよく見られる。またPhase-IIでは合田波力を上回る衝撃力がパラペットに作用しているが、ほとんど滑動していないことも分かる。

以上より換算された有効波力の妥当性が確認でき、連成ばねモデルを用いて換算した有効波力により滑動安定性を概ね説明できることが分かった。したがって、後部パラペット型上部斜面堤への作用波力の検討は、換算した有効波力を用いて行った。

5. 直立部衝撃力作用時の検討 (Phase-I)

5.1 砕波帯の大規模渦を考慮した作用波力の分類

現行の合田式では、砕波帯内においては設計波高として設置水深での有義波高 $H_{1/3}$ の5倍沖側の最大波高 H_{max} を用いることになっている。しかし、合田(1973)によると急勾配の岩礁海岸など衝撃砕波力が作用する場合には、適宜(5～10) $H_{1/3}$ 沖の H_{max} を用いるべきであるとしている。しかしながら、本研究では波高を見直すのではなく、堤体位置における砕波帯の大規模渦の影響を考慮して作用波力の分類を試みた。

作用波力の分類の概念図を図-3に示す。ここでは岡安ら(1989)を参考に、砕波点から突っ込み点 x_p 、ポア形成点 x_t と防波堤設置位置 x_b の関係が作用波力に及ぼす影響を調べた。砕波点からそれぞれまでの距離 l は岡安ら(1989)にならい次式で評価した。

$$l_p = 2.5 h_b \dots \dots \dots (1)$$

$$l_t = (1.0/5.0 \tan \beta + 4.0) h_b \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 h_b は砕波水深、 $\tan \beta$ は海底勾配である。

これらの位置と作用波力の関係を調べた結果を図-4に示す。図は有効波力と合田波力を比較したものであり、白抜きは防波堤の位置が x_t より岸側にある場合、黒塗りは砕波点寄りである場合である。有効波力は合田波力に比べて大きくなっている。また両者の分布が異なるようである。これは連行された渦の存在によるものと考えられ、波高は減少しても大規模渦がエネルギーを失わない

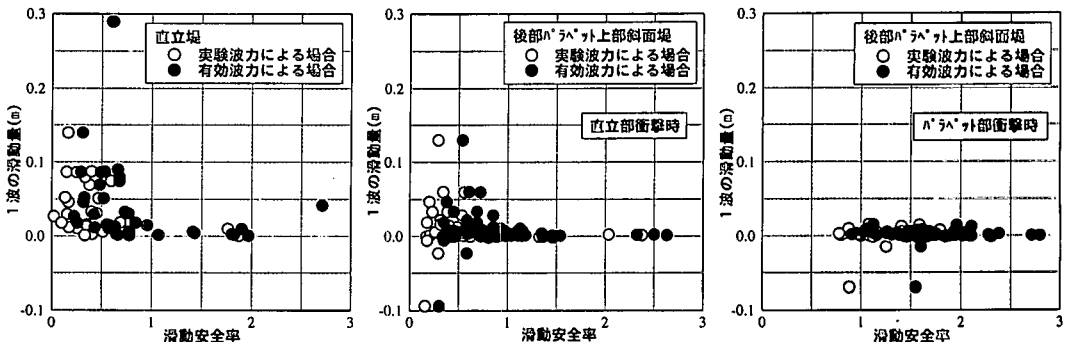


図-2 滑動安全率と1波の滑動量の関係

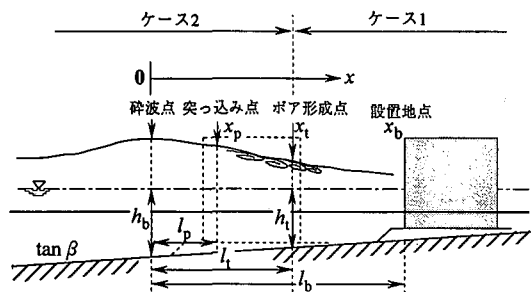


図-3 砕波帯の大規模渦の影響を考慮下作用波力の分類

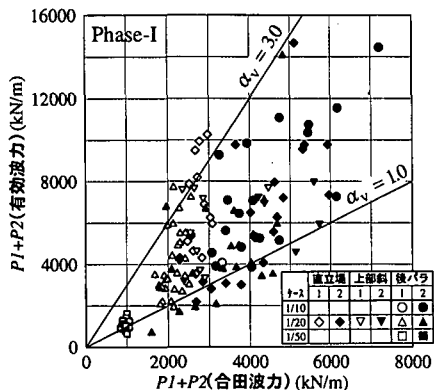


図-4 合田波力と有効波力の比較

まま堤体に作用したためと考えられ、波力作用のメカニズムが x_t を境に異なるものと考えられる。また防波堤が x_t よりも近い時には、海底勾配が大きいほど合田波力よりも大きくなる傾向がみられる。したがって、防波堤が x_t より岸側の場合(ケース1)と x_t より砕波点寄りの場合(ケース2)に分類して波力の割増を考えることにした。

5.2 波力の直立部割増係数の評価

5.1 の検討を基に、防波堤設置位置がボア形成点 x_t より岸側にある場合(ケース1)と砕波点寄りにある場合(ケース2)に分類し、波力の直立部割増係数の評価を行った。評価にあたっては直立堤、上部斜面堤の結果とともに、別途実施された海底勾配 1/50 の後部パラペット型上部斜面堤の実験結果(関本ら, 1996)も加え、より広範な実験条件に対して検討した。有効波力と合田波力の比と、種々のパラメタとの関係を調べた結果、ケース1では合田式における α_2 と surf similarity パラメタ ξ ($=\tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}$) を用いて、ケース2では surf similarity パラメタ ξ を用いて評価することを試みた。

図-5 は直立部割増係数 α_v と α_2 および ξ との関係を分類したケース毎に示したものである。図中のシンボルは実験結果で、直線が提案する直立部割増係数 α_v で次式のようになる。

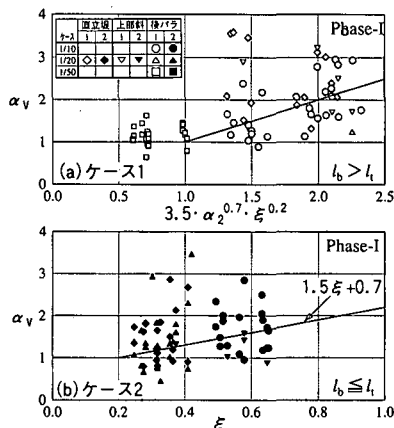
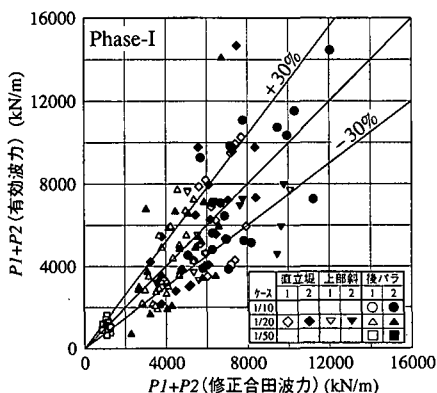

 図-5 直立部割増係数 α_v と α_2 および ξ との関係


図-6 修正合田波力と有効波力の比較

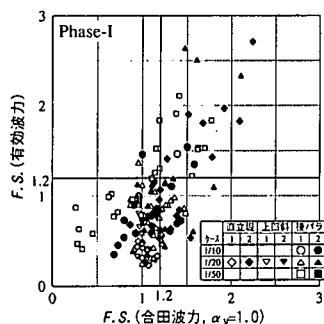
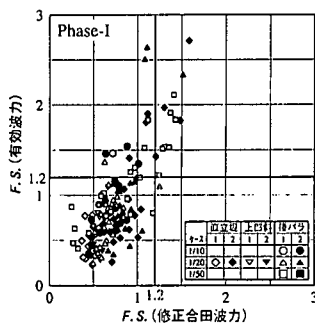
$$\alpha_v = \begin{cases} 3.5 \cdot \alpha_2^{0.7} \cdot \xi^{0.2} & (\text{ケース1}) \\ 1.5\xi + 0.7 & (\text{ケース2}) \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

$$\alpha_v = \begin{cases} 3.5 \cdot \alpha_2^{0.7} \cdot \xi^{0.2} & (\text{ケース1}) \\ 1.5\xi + 0.7 & (\text{ケース2}) \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

提案した α_v を用いて割増した修正合田波力と有効波力との関係を図-6 に示した。若干のばらつきはみられるが、堤体位置とボア形成点の関係式(3)、(4)で α_v を評価すると、概ね $\pm 30\%$ 以内に収まっており、図-4 に比べてかなり改善される。ばらつきの原因は、堤体前面での長周期水位変動の影響であると考えられる。

5.3 滑動安全率の評価

実際の設計にしたがって、修正合田波力を用いた場合の滑動安全率を算出し、現行の合田波力を用いた場合の値との比較を行った。その結果を図-7 に示す。図中にはケース1、ケース2ともにプロットしてある。有効波力による滑動安全率が 1.0 を下回り、滑動したケースに対して、合田波力をそのまま用いると滑動安全率が 1.0 を上回るケースが多くみられるのに対して、割増係数 α_v を用いることで実験結果(有効波力による滑動安全率)を説明できるようになった。ただし、有効波力による滑動

(1) 合田波力による場合 ($\alpha_F=1.0$)

(2) 提案式による場合

図-7 滑動安全率 (直立部衝撃時)

安全率が1.0を越えるケースでも、修正合田式で1.0を下回る場合がみられる。これは図-8に示すように、有効揚圧力が合田式による揚圧力を下回るケースが多くみられるためであると考えられる。ここで、有効揚圧力とは直立部に作用する衝撃力の影響が堤体底版の前趾側にのみ伝わるものとして低減させたものである。この効果まで考慮すると更に合ってくると思われる。しかし、合田式による揚圧力が包絡値であり、堤体の滑動安定性を評価する上では安全側の評価になるので、現状では揚圧力は合田式による値を用いれば良いと考えられる。

6. パラペット部衝撃力作用時の検討(Phase-II)

6.1 パラペット部波力

パラペット部の合田式に対する波力の割増係数 α_p と surf similarity パラメタ ξ との関係を調べた。その結果を図-9に示す。実験結果にはばらつきがあるが、全体として ξ が大きくなると α_p が小さくなる傾向がみられる。ここでは次式で α_p を評価する。

$$\alpha_p = -3.0\xi + 3.4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

6.2 上部工天端に作用する鉛直下向き波力

上部工天端に作用する鉛直下向きの波力の評価を試みた。Phase-IIにおける上部工天端に作用する波圧分布を調べると、パラペット下端近くで鉛直下向きの大きな波圧が作用するケースがみられた。ここでは、図-1に示したように、上部工天端の斜面側で斜面上端側の合田波圧

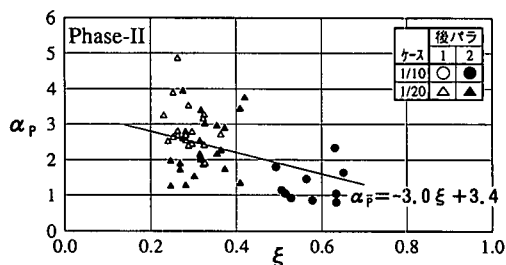
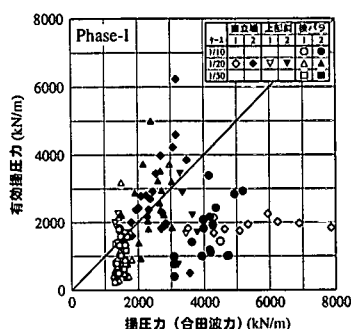
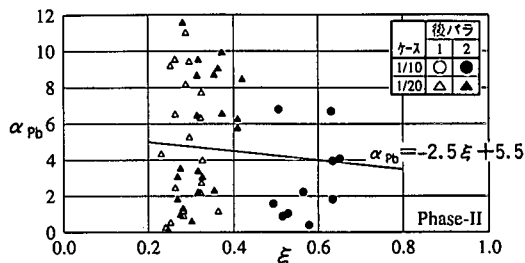
図-9 パラペット部波力割増係数 α_p と ξ との関係

図-8 有効揚圧力の比較

図-10 パラペット下端波圧の割増係数 α_{pb} と ξ との関係

が、パラペット下端ではこの合田波圧の α_{pb} 倍の波圧が鉛直下向きに作用する台形の波圧分布を考えた。パラペット部波力の評価と同様に α_{pb} と ξ との関係を調べた。その結果を図-10に示す。パラペットの波圧分布を調べると比較的パラペットの上側に大きな波圧が作用するような場合もあり、ばらつきが大きい。平均的な傾向として次式で評価することにした。

$$\alpha_{pb} = -2.5\xi + 5.5 \quad \dots\dots\dots (6)$$

6.3 位相差による直立部波力および揚圧力の低減効果

後部パラペット型上部斜面堤は、前面直立部に作用した波がパラペットに到達するまでに位相差が存在するので、Phase-IIにおける直立部波力および揚圧力はPhase-Iにおける値よりも低減することが可能である。

位相差を長波の波速を用いて表すことを試みた。図-11は、実験結果の位相差と長波の波速で進行した場合の位相時間の比較をした結果である。図中には関本ら(1996)による海底勾配1/50の実験結果も併せて示している。ばらつきはあるものの、概ね次式で位相時間を表すことができる。

$$\Delta t = l / (1.5\sqrt{gh}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 l は前面直立壁からパラペットまでの水平距離である。この式は位相差のほぼ下限を与えており、低減する直立部波力としては上限値をとることになる。

次に、Phase-II ($t=t_2$) における直立部波力および揚圧力と合田波力の比較を行った。直立部波力については、

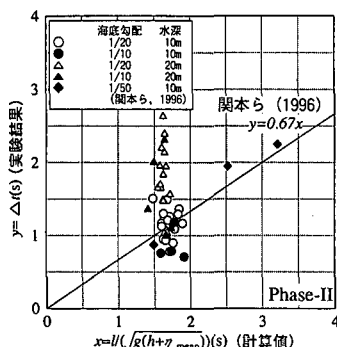


図-11 位相差の検討

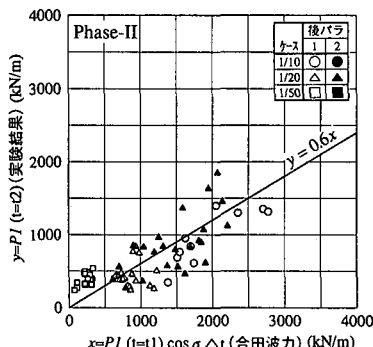


図-12 位相差による直立部波力の低減

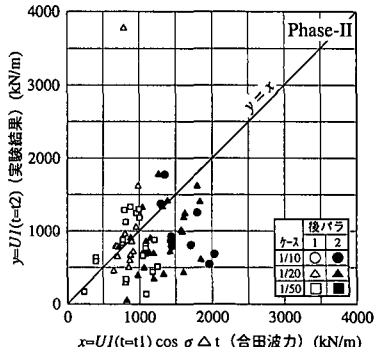


図-13 位相差による揚圧力の低減

合田波力が Phase-I ($t=t_1$) における値であるとし、(7)式による位相時間の間に正弦的に低減させた波力との比較を行った。直立部波力の比較を図-12に、揚圧力の比較を図-13に示す。なお、図-12で $\sigma=2\pi/T$ である。ばらつきはあるが、直立部波力の低減係数は平均的な値として0.6とした。揚圧力についてもばらつきがあり、合田式より小さいケースも多くみられるが、設計上安全側となる1.0とした。

6.4 滑動安全率の評価

6.1~6.3で評価した Phase-II における各波力を用いて算出した滑動安全率と有効波力による滑動安全率の比較を行った。その結果を図-14に示す。合田波力による場合は、直立部、斜面部、パラペット部に合田波力が作用し、位相差も考慮しない場合である。有効波力による滑動安全率が1.0を上回る場合で、合田波力による滑動安全率が1.0を下回るものがあり、波力を過大に評価していることがわかる。それに対して、修正した合田波力によると1.0を上回り、有効波力による滑動安全率を概ね説明できる。

7. あとがき

後部パラペット型上部斜面堤を対象に、広範囲な条件で行った水理模型実験結果を基に、現行の設計基準である合田式をベースに衝撃砕波力を考慮した設計波力の評価法を提案した。その結果、提案した設計波力により実験結果の滑動安定性を概ね評価できることが分かった。

パラペットに衝撃波力が作用する際、端趾圧が980 kN/m (100 tf/m) を越えるケースもある。現行の基準であるビショップ法により照査を行うと満足する結果であったが、端趾圧で断面が決まるケースも考えられる。パラペット位置による位相差についても、今回は低減係数を0.6としたが今後の検討課題の一つである。また水位により波力は異なるため、長周期水位変動の効果を取り込めるとさらに精度の良い設計法となる。これらを明らかにしていくことが、今後実用化に向けての課題であ

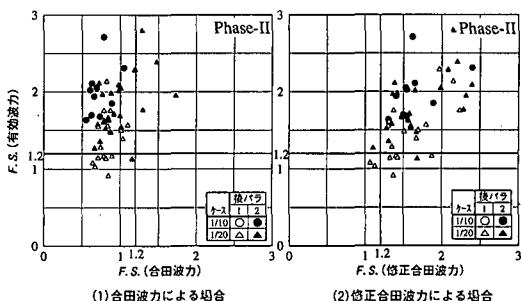


図-14 滑動安全率 (パラペット部衝撃時)

る。

最後に、本研究を進めるのに当たり、(財)電力中央研究所 鹿島遼一氏、田中寛好氏には御指導、御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 砕波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 31-35.
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): ポア状砕波の形成点に関する実験的研究, 第44回年次学術講演会概要集, Vol. II, pp. 614-615.
- 合田良実 (1973): 衝撃砕波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察, 港研報告, 第12巻, 第3号, pp. 3-29.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第12巻, 第3号, pp. 31-69.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 88-94.
- 関本恒浩・片山裕之・鶴飼克臣・清水琢三 (1996): 後部パラペット上部斜面ケーソン堤の水理特性に関する研究, 五洋建設技術研究所年報, Vol. 26, pp. 37-46.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680.
- 田崎 敏・岡部成光・池田浩一・藤田浩二・榊山 勉 (1995): 衝撃砕波力低減のための後部パラペット上部斜面堤の開発, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 911-915.
- Goda, Y. (1994): Dynamic response of upright beakwaters to impulsive breaking wave forces, Coastal Eng., Vol. 22, pp. 135-158.