

不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について

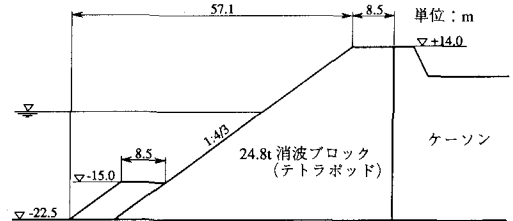
鹿島遼一*・柳山 勉*・清水琢三**
関本恒浩***・国栖広志****・京谷 修*****

1. はじめに

沖合人工島防波護岸の設計に際しては、その重要性に鑑み、通常の設計波に対しては現行の設計法を満足するとともに、それを超える極めて希な外力に対しては人工島に要求される機能が維持できる範囲で多少の変形は許容するという、防波護岸の構造耐力を考慮した新しい設計概念が提案されている(例えば、鹿島ら, 1988; 鹿島・阿部, 1992)。著者らはこれまで消波工の変形過程と防波機能の関係について水理模型実験を中心に検討し、この設計概念の妥当性を確認している(鹿島ら, 1992; 1993)。しかしながら、このような設計概念を実際の設計に反映させるためには、防波護岸の変形をあらかじめ定量的に予測・評価する必要があるが、現在までのところ傾斜堤についてこのような検討が若干行われているものの(たとえば van der Meer, 1987)、防波護岸を対象にした検討は行われていない。そこで本研究では、消波ブロック被覆堤ケーソン護岸を対象に被覆工の変形量を波高、周期、波の継続時間、法面勾配などの関数として評価する方法について、水理実験結果に基づき検討した。なお、消波ブロックの変形の際、消波ブロックが破壊する可能性があるが、消波ブロックは鉄筋等で補強することを前提とし、ここでは、消波ブロックの破壊については考慮しなかった。

2. 水理模型実験

水理模型実験は幅 5 m、長さ 34 m の不規則波造波水槽の一部を仕切ることにより幅 60 cm の水路を設け、この水路内に 1/87.5 の模型を設置して行った。模型床はモルタル製であり、模型前面の海底勾配は 1/100 とし造波板前面の 5 m の一様水深部と 1/100 勾配斜面の間の 4 m の区間は 1/10 勾配でつないだ。防波護岸の模型は図一 1 に示すように、消波工全断面を 24.8 t (模型: 36.8 g) のテトラポッドで被覆した消波ブロック被覆式ケーソン堤



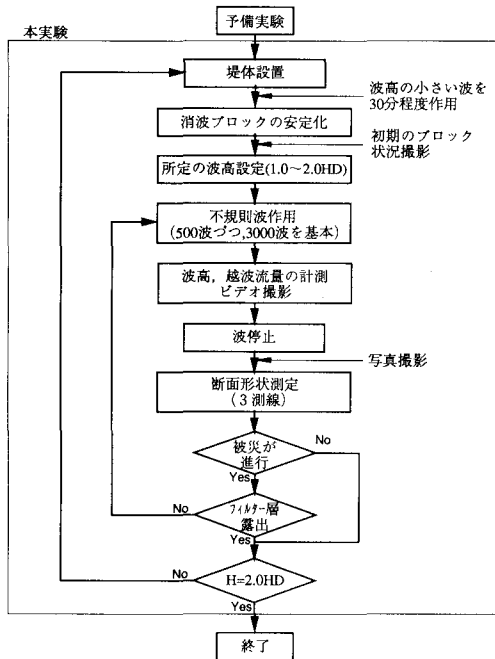
図一 実験に用いた護岸模型の諸元 (現地換算)

形式である。消波工の法面勾配は 1:4/3 であり、消波工天端幅はブロック 2 個並びとした。また、模型の設置水深は 22.5 m であり、パラペットおよび消波工の天端高は、沖波換算波高 10 m、周期 16 s の条件に対して越波流量が 0.05 m³/s/m となるように静水面上 14 m とした。

実験に用いた波は Wallops 型スペクトルを有する不規則波であり、スペクトルの形状母数は Bretschneider-光易型スペクトルに相当する $m=5$ とスペクトル形状が先鋭で長距離伝播したうねりの条件に相当する $m=11$ を用いた。これらの条件に対して、有義波周期を 12, 16, 20 sec (1.28, 1.71, 2.14 s) の 3 通り変化させ、それぞれに対して、波高をハドソン式から決まる消波ブロックの安定限界波高 $H_b (=6.86 \text{ m})$ の 1.0~2.0 倍の範囲で変化させて合計 38 ケースの実験を行った。

図二は実験フローを示したものである。実験は、各波高毎にケーソン前面に消波ブロックを設置後、ブロックが移動しない程度の小さな規則波を約 30 分間 (約 1000 波) 作用させ、ブロックをある程度締固めて初期状態とした後、所定の波を 3000 波 (現地換算約 13 時間) を標準として作用させた。最初に作用させる 250 波を除き、一度に作用させる波の数は 500 波とし、同一の不規則波を繰り返して作用させた。なお、消波ブロックの変形過程を測定するために各波高レベルそれぞれについて 250 波、500 波、1000 波、2000 波、3000 波終了毎に消波ブロックの変形形状の測定と写真撮影を実施した。3000 波以内に堤体の変形が定常状態に達したと判断された場合や、変形が進行し著しく防波機能を損なったと判断される場合 (変形が表層 2 層まで到達した場合) には適宜判断して 3000 波以内でも実験を終了した。また、3000 波を超えても変

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所
** 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部
*** 正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 第一研究開発室
**** 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 第一研究開発室
***** 正会員 工修 東京電力株式会社 原子力建設部 土木建築課



図一2 実験フロー

形が進行する場合にはさらに継続して最大7000波まで波を作用させた。

消波工の変形量はタッチ式砂面計3台を堤体法線方向に15 cm間隔で並べ、法線直角方向に1 cmピッチで計測した。なお、法線直角方向の計測ピッチは事前の予備検討より決定し、変形量は3台の砂面計の平均値によって定義した。また、ブロックの移動個数は実験中に撮影した写真から読み取り算出した。

3. 消波工変形量の評価

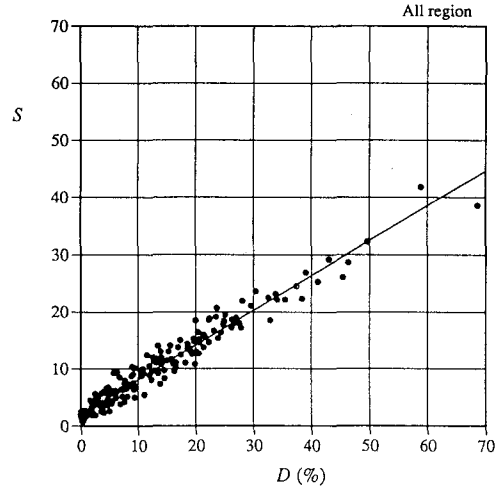
消波工の変形量の評価は式(1)に示す van der Meer が捨石堤に対して導入した変形レベルにより行った。

$$S = A/D_n^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 A は侵食面積、 D_n は同一重量の立方体を仮定した場合のブロックの代表長さ($= (W/\gamma_s)^{1/3}$, W はブロック重量、 γ_s はブロックの単位体積重量)である。図一3は変形レベル S と被害率 $D(\%)$ の関係を示したものである。ここで、被害率 D は2層被覆した全個数に対する移動個数の百分率として定義した。この図より変形レベル S と被害率 D の間にはほぼ比例関係が見られ、

$$S = 0.6D \quad \dots\dots\dots (2)$$

となった。したがって、通常用いられる不規則波に対する安定限界の被害率 $D=5\%$ は変形レベルでは $S=3$ に相当する。なお、式(2)の比例乗数0.6は空隙率、ブロック形状、ブロック重量に依存する係数である。ただし、ブロック重量に対する依存性は小さく、また空隙率はブ

図一3 被害率 $D(\%)$ と変形レベル S の関係

ロックの形状が同じであれば一定であることから、比例定数はブロック形状のみの関数と考えてよい。

実験データは、式(2)で示される直線のまわりにばらついているが、被害率 D が10%より大きい場合、 S のばらつきは±3程度であり、変形レベルの測定精度は概ねこの程度と考えられる。

4. 実験結果

4.1 変形特性

図一4は消波工の変形レベル別に変形断面をスペクトルの形状母数 $m=5$ と $m=11$ の場合について示したものである。この図は変形レベル S のみを対象に分類した図であり、変形レベルが図中の S の表示値の一割程度の範囲に入るものを抽出し図化したものである。なお、波高、周期および波の作用時間についてはランダムに抽出している。この図より消波工は静水面付近が最も侵食し、堤脚部付近に堆積するいわゆるS字型断面に変形することがわかる。なお、著者ら(1992)が実施した比較的低天端の場合や作用波高が非常に大きく著しい変形が見られる場合は、ケーソン壁面が露出し変形形状はS字型ではなく直線的になる。

次に変形レベルに着目すると、変形形状は各変形レベルごとに非常によくまとまっており、変形レベル S が同じであれば、波高や周期、スペクトル形状などの波浪条件ならびに作用時間によらず変形形状はほぼ同じといえる。このことは堤体の変形特性を考える上で非常に有利となる。すなわち、変形後の断面形状は変形レベル S によって一義的に決まるため、消波工の変形特性についての議論は波浪条件や波の継続時間と変形レベルの関係のみを考えればよい。そこで、以下では変形レベル S と波浪条件あるいは波の継続時間の関係について検討を行

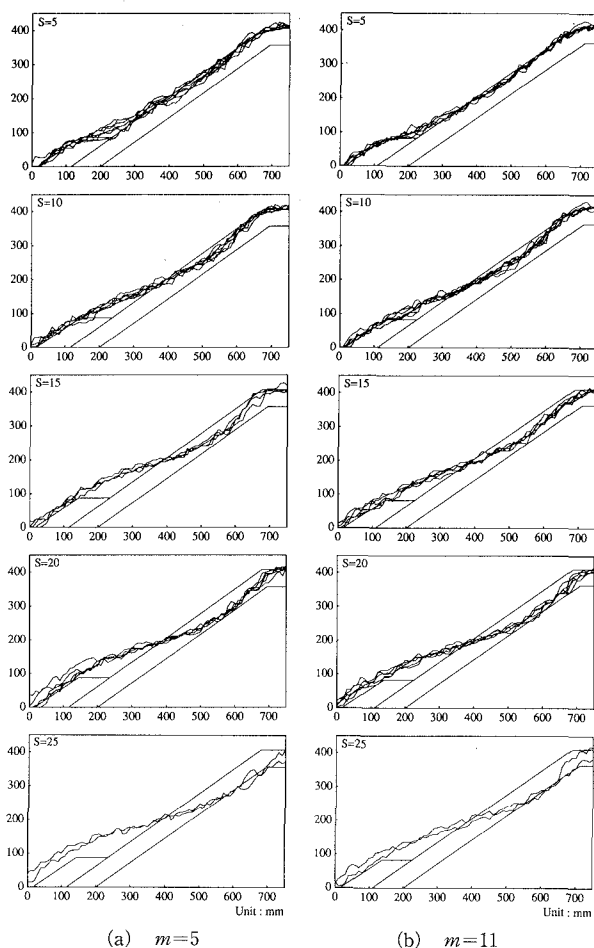


図-4 変形レベルSごとの変形断面形状

う。

4.2 波の継続時間の影響

堤体の変形は波を作用させた直後に比較的大きく変形し、時間の経過とともに変形量も徐々に落ち着いてくる

傾向が見られる。図-5は有義波周期16sのケースを例にとり、変形レベルと波の継続時間の関係を示したものである。波高が小さい場合には波を長時間作用させても変形があまり進まない場合が見られるが、全般的には作用波数の平方根に比例して変形が進む傾向が見られる。この傾向は周期やスペクトル形状によらず同じである。van der Meer (1987) も傾斜堤について変形レベルと波の継続時間の関係を調べており、変形量は近似的に波の継続時間の1/2乗に比例することを指摘している。

4.3 変形レベルと surf similarity パラメタの関係

ブロックの変形は波浪による静水面付近の流れによってブロックに抗力が作用するためであることが古くから知られている。本実験では、静水面付近に碎波による水塊の打ち込みによる強い流れが見られ、up-rush時にその強い流れに起因する抗力によってブロックがロッキングを起こす。このときブロック相互のかみ合わせの弱い部分では、ブロックが岸側に打ち上げられ、続く down-rush時に波とともに堤脚へと転落することが撮影されたビデオから確認された。このため、消波工の変形は消波工斜面上における碎波形式に依存する。傾斜堤に関する既往の研究によれば、捨石の安定性は surf similarity パラメタ ξ_s によって整理できることが明らかにされている(樫木・柳, 1983; 柳ら, 1986; van der Meer, 1987)。また、斜面上の共振現象による捨石の安定性の低下もこのパラメタで説明できる(樫木ら, 1982)。

図-6は、変形が小さい場合 ($S=2$) とある程度変形の進んだ場合 ($S=10$) の1000波作用後の安定係数 N_s と surf similarity パラメタ ξ_s との関係を示したものである。ここで、 N_s および ξ_s は次式により求めた。

$$N_s = H_{1/3} / \Delta D_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

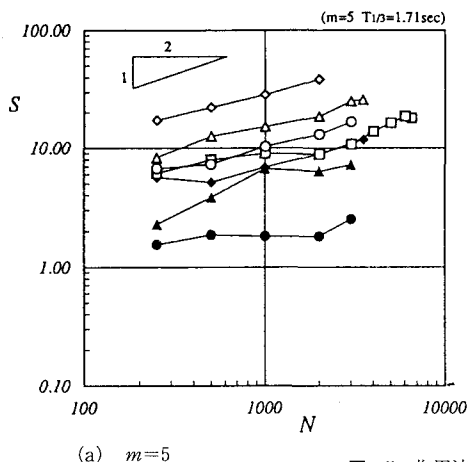
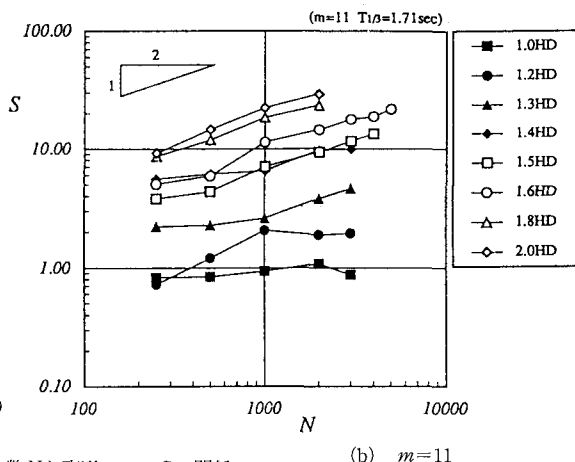


図-5 作用波数Nと変形レベルSの関係



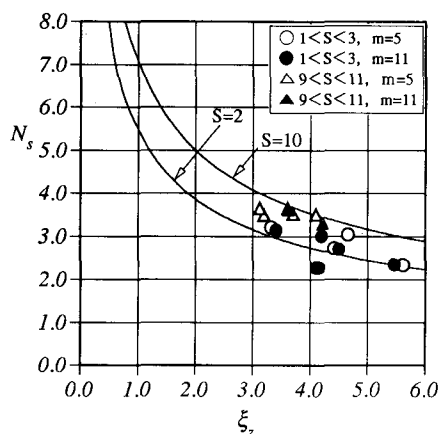


図-6 安定係数 N_s と surf similarity パラメタ ξ_z の関係

$$\xi_z = \tan \theta / (H_{1/3}/L_0)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 Δ は消波工の水中比重 ($=\gamma_s/\gamma_w-1$, γ_w は水の単位体積重量), $\tan \theta$ は消波工の斜面勾配, L_0 は沖波波長であり, L_0 は van der Meer (1987) と同様, スペクトルモーメントから求めた平均周期 T_2 を用いて評価した。なお, 図中には後述する実験結果に基づく変形量評価式による結果も実線で示されている。これによれば, 本実験範囲では安定係数 N_s は ξ_z の増大とともに低下していることがわかる。また, N_s は ξ_z の $-1/2$ 乗にほぼ比例していることが確認された。

なお, van der Meer の捨石の実験によれば ξ_z が 3.5 より大きい場合砕波形態が巻砕波から砕け寄せ波に変化し, それに伴い堤体の安定性も ξ_z が大きくなるにつれて増加する傾向となることが示されている。また, 樫木ら (1982) によれば, ξ_z が 2~3 の範囲のとき up-rush と down-rush の周期が入射波の周期と一致するため, 斜面上で共振現象が生じ, 捨石の安定性が低下するとされている。本実験においては, ξ_z が 3.5 を超えても van der Meer が指摘した ξ_z の増加とともに堤体の安定性も増加するような現象は見られていない。これは, 堤体の透過性の違いにより斜面上の波の変形が捨石の場合と消波ブロックの場合では異なるためと考えられる。また, 本実験では ξ_z が 3 よりも小さい条件での実験は行わなかったため共振現象の有無は確認できなかった。ただし, 本実験における実験波浪条件は実験水深から想定される設計波の 1.5 倍程度までの波高を対象としており, 波形勾配としては比較的急な条件を対象としている。したがって, 本研究で対象としている水深において, 堤体の安定性に影響を及ぼすような高波浪条件を考える場合, ξ_z が 2~3 の範囲となる可能性は小さいものと考えられる。

4.3 変形レベルの評価式

これまで, 変形レベルと波の継続時間および消波工の安定係数と surf similarity パラメタの関係について考察

してきた。その結果変形レベルは波の継続時間の $1/2$ 乗に比例し, 安定係数は surf similarity パラメタの $-1/2$ 乗にほぼ比例することがわかった。このことから, 変形レベル S は, 捨石堤に対する van der Meer (1987) の巻波砕波時の公式とほぼ同様の形で評価できるものと考えられる。van der Meer の評価式においては堤体の透水性を表すパラメタが含まれているが, 透水性に関する検討は現在実施中であり, ここでは透水性の影響を比例定数に含めることとした。スペクトル幅別に整理した実験データより, 実験式として以下の式を得た。

$$N_s = 8.5 (S/N^{1/2})^{0.16} \xi_z^{-1/2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, N は作用波数 (波の継続時間) である。

図-7 は縦軸に変形レベルと波の継続時間の平方根の比をとり, 横軸に安定係数と surf similarity パラメタの平方根の積をとって, 実験データと式 (5) の関係を示したものである。波高, 周期などの実験条件, 作用波数や変形レベルによらず実験値とよい一致を示していることがこの図からわかる。また, スペクトル幅の影響もみられなかった。スペクトル幅の影響は波群特性のうち主として波の連なりに寄与することから, 式 (5) で評価する限り安定係数あるいは変形レベルに対して波の連の影響は現れない。van der Meer (1987) によれば, スペクトルモーメントによる平均周期を用いて ξ_z を定義しているため, スペクトル幅の影響は ξ_z に既に含まれる。ただし, 波群特性のうち Groupiness Factor で代表されるような高波の大きさを表すものについては, スペクトル形状とは明確な関係が見られないため, 消波工の変形に及ぼす GF の影響については別途の検討を要する。

安定限界以上の波浪が来襲した場合の消波工の変形量は, 現行設計にしたがって設定された消波工重量に対し, 式 (5) より波の継続時間を考慮して評価できる。また, 式 (5) を用いることにより消波工にすでにある程度の変形があり, そこにある波高の波が来襲する場合の変形レベルを推定することが可能である。すなわち, その波高が作用したときの変形量が初期の変形レベルに一致する仮定の継続時間を式 (5) から逆算し, その仮定の継続時間とその波自身の継続時間を加えたものを新たな継続時間とする。この新たな継続時間より式 (5) を用いて変形レベルを求めることにより, 初期変形がある場合の消波工の変形レベルが予測できる。さらに, この初期変形量を累積変形量と考えることにより波高の時系列を考慮した変形レベルを予測することも可能である。

5. おわりに

本研究では水理模型実験を通じて以下のことが明らかになった。

- ① 消波工は静水面付近が最も侵食し, いわゆる S 字

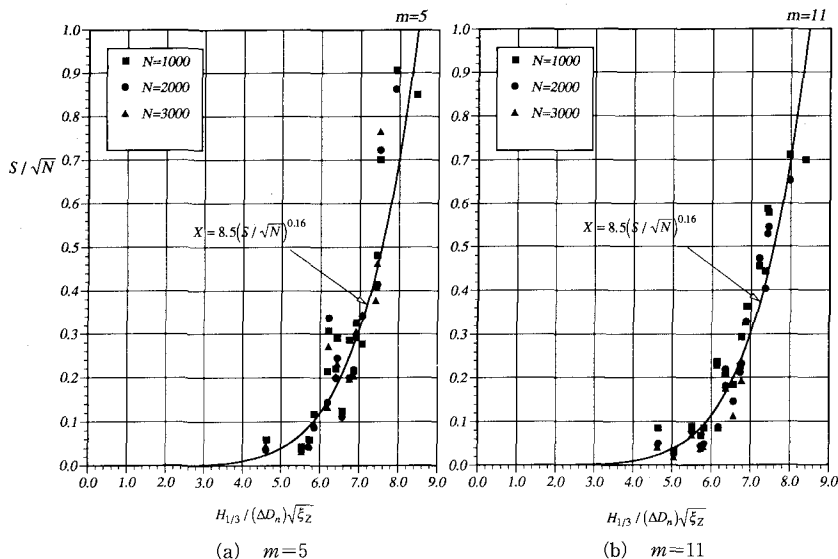


図-7 式(5)の適合性の検討

型断面に変形するが、変形レベル S が同じであれば、波高や周期、スペクトル形状などの波浪条件ならびに作用時間によらず変形形状はほぼ同じである。

② 波高が小さい場合には波を長時間作用させても変形があまり進まない場合が見られるが、全般的には作用波数の平方根に比例して変形が進む傾向が見られる。この傾向は周期やスペクトル形状によらず同じである。

③ surf similarity パラメタ ξ_z の増大とともに消波工の安定係数 N_s が低下する。また、 N_s は ξ_z の $-1/2$ 乗にほぼ比例することが確認された。

④ 変形レベル S については、捨石堤に対する van der Meer (1987) の巻波砕波時の公式とほぼ同様の形の実験式を提案した。これは波高、周期などの実験条件、作用波数や変形レベルによらず実験値とよく一致した。

⑤ 安定限界以上の波浪が来襲した場合の消波工の変形量を、波の継続時間を考慮して評価できる。

また、今後はさらに以下の検討を加え、変形量評価式の一般化を行う予定である。

① 斜面勾配の影響を surf similarity パラメタで考慮することの妥当性を検討するとともに、透水性の影響を考慮できる評価式に改良する。

② 変形レベル S の作用波数に対する変化を波高の関数として検討する。

③ 時化の履歴を考慮した変形量評価法の妥当性を確認する。

④ 侵食断面積を表すパラメタ S のみならず、最大侵食深さ、侵食域上限高さ、下限高さ等についても検討を行い変形形状を詳細に予測できるようにする。

最後に、本研究は、電力 9 社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施されたものである。本研究を進めるに当たり、土木学会原子力委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授)、同耐波浪設計 WG(主査 西村仁嗣筑波大学教授)の主査ならびに委員、メンバーの各位には数多くの貴重な助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 鹿島遼一・高階實雄・島田真行・今泉正次・植田和哉 (1988): 沖合人工島外郭施設の設計の考え方について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 602-666.
- 鹿島遼一・阿部宣行 (1992): 沖合人工島外郭施設の耐波設計について, ウォーターフロント開発シンポジウム講演会論文集, pp. 251-256.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1992): 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波護岸の変化について, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 671-675.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 686-690.
- 榊山 亨・柳 青魯・大西明徳 (1982): 捨石防波堤斜面乗の共振現象による破壊機構, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 428-432.
- 榊山 亨・柳 青魯 (1983): 捨石防波堤の複合断面設計に関する基礎的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 361-365.
- 柳 青魯・榊山 亨・金 崇慶・張 善徳 (1986): 不規則波力を導入した捨石堤の新設計手法, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 372-376.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layers design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.