

海岸構造物の費用最適化設計 Algorithm 開発

柳 青 魯*・金 鍾 旭**・姜 閔 求***・李 益 孝****

1. 序 論

捨石防波堤などの海岸構造物の設計には規則波を対象にする多数の設計式が提案されている（例えば Hudson, 1959 ; C.E.R.C., 1984）。また、最近では不規則波を対象にする設計式も提案されて, Ryu and Sawaragi (1986) と Van der Meer (1987) の式がある。これらの設計式はいずれも決定論的安定性の評価に主眼をおいたものである。このような決定論的設計概念から Smith (1987) は海岸構造物の最適化設計を提案している。海岸構造物の設計において経済的効率性の評価及び考慮は安定性の解析と同様に重要な要素であり、総費用を最小化する視点で検討すべきである。建設費と維持・補修費の合計で評価できる総費用は不確定的性質をもつ設計外力の決定に大きく左右される。

従来、このような費用評価は決定論的手法によって行なった場合が大部分で、外力の不確定性、許容破壊率（被災率）、構造物の波浪制御機能をも考慮した費用最適化設計 algorithm の開発は海岸域の効率的開発において重要な研究課題といえる。このような認識のもとで、本研究では海岸の多様な形式の捨石式構造物を対象にして従来の手法と最適化技法を適用、外力の不確定性を設計外力条件として考慮し構造物の波浪制御機能及び許容破壊率を導入した安定性が同時に満足できる費用最適化設計 algorithm を開発し、その適用性を検討する。

2. 費用最適化設計 Algorithm の概要

許容破壊率、越波、反射波などの水理特性の制御機能、外力特性（極値波浪）の不確定性を考慮する費用最適化設計 algorithm の流れを示すと 図-1 のようになる。この図から見ると、まず発生頻度の低い極値外力の再現周期 (RP_{max}) と構造物の重要度によって決められる許容破壊率の上限値 (AD_{max}) を決定し、評価したい許容破壊率 ($AD_j, j=1, 2, 3, \dots, N$) と再現周期

($RP_i, i=1, 2, 3, \dots, NN$) を設定する。次に極値外力の解析結果から得られる再現周期別設計波高・周期による安定性、波浪制御など設計制約条件を満たしながら最小断面をもつ設計諸元を求め、初期建設費を計算する。この時、最小断面の決定方法は最適化技法を利用し、従来の方法による結果は最適設計法の初期値として利用する。また任意の外力に対する破壊率を評価し、被災補修費及び構造物耐久年数に対する総費用を計算する。このような計算を反復しながら総費用 (TC) の最小になる再現期間の外力と許容破壊率を決定し、これに対する構造物の設計諸元を求めていく設計 algorithm である。

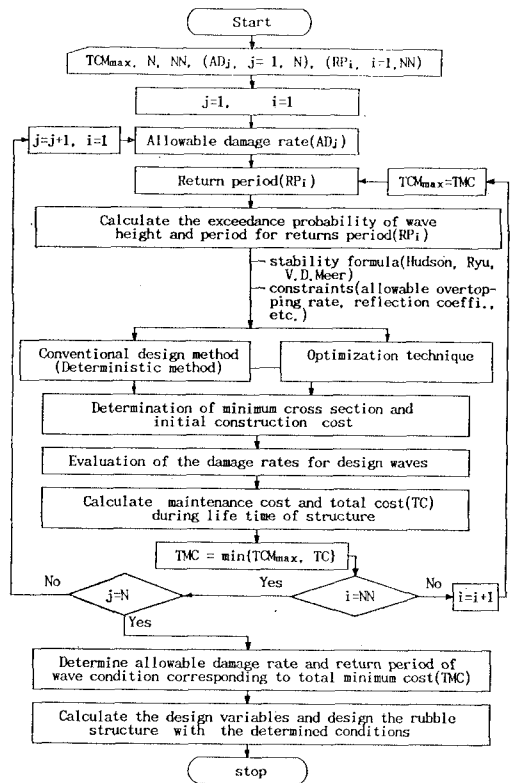


図-1 捨石構造物の最適設計の流れ

* 正会員 工博 釜山水産大学副教授 海洋工学科
 ** 工修 現代重工業(株)船舶海洋研究所 研究員
 *** 工修 釜山水産大学大学院 海洋工学科
 **** 工修 麗水水産大学助教授 海洋土木工学科

3. 構造断面の最小化方法

3.1 設計変数

一様断面をもつ防波堤の設計変数は図-2のように設定して次のように考えられる。

$$x=(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7)^T \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 X_1 は外海側傾斜面の幅、 X_2 は天端幅、 X_3 は港内側傾斜面の幅、 X_4 は天端高、 X_5 は被覆材の単位長さ、 X_6 は被覆層の厚さ、 X_7 は filter 層の厚さである。

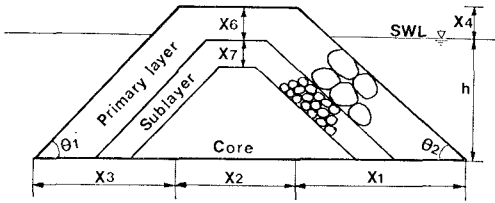


図-2 一様断面捨石堤の設計変数

3.2 従来の決定論的方法の適用

従来の決定論的方法は設計断面寸法を決定するために設計式などの制約条件から設計変数を直接決定する方法である。例えば、許容破壊率を考慮して斜面の傾斜 ($\cot \theta$) を決定し、許容越波量により天端高 (X_4)、捨石重量算定式により被覆石重量 (W)、 X_5 、 X_6 、 X_1 、 X_2 、 X_7 、 X_3 、 θ_1 を順次的に決定していく方法である。

3.3 最適化技法の適用

最適化技法は構造物設計時各種制約条件を満足しながら目的関数 (断面積または費用) を最小化する設計変数を決定する方法である。本研究では非線型計画問題に対する最適設計技法中制約最適化問題を非制約最適化問題と変換して逐次的に解を求める SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Techniques; Kuester, 1973) を利用する。

a) 目的関数

建設費用は構造物の断面積と直接的関係をもつので次式のように断面積を目的関数として考えられる。

$$f(x)=f(X_1, X_2, \dots\dots\dots, X_7) \\ =A_p+A_s+A_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A_p 、 A_s 、 A_c は各被覆層、filter層、core部の断面積である。

b) 制約条件

i) 外力条件

外力となる波浪の極値解析により再現期間別波浪推算が可能である。ここでは次のような方法により入力資料を作ることにする。

$$H_{1/3}'=H_{1/3}+\sigma H_{1/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$T_{1/3}'=T_{1/3}+\sigma T_{1/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $H_{1/3}'$ 、 $T_{1/3}'$ はそれぞれ波浪の極値解析資料の分散特性すなわち極値の不確定性を考慮した波高・周期であり、 $\sigma H_{1/3}$ 、 $\sigma T_{1/3}$ は極値波浪の不確定性を表わす parameter である。ここで、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ は次式のように極値の Weibull 分布を仮定する場合、再現期間 (周期) 別波高・周期を表わす変数 X の式から求められる。

$$RV=[-\ln\{1-P(X\leq X_{m,n})\}]^{1/k} \\ X=a_0RV+b_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 RV は変換した非超過確率に対する変数、 m は資料の順位 (最大値: $m=1$)、 n は資料の数、 X は変数 (波高または周期) k は分布関数の母数であり、 a_0 、 b_0 は常数である。この式 (6) から再現周期別波高・周期が入力資料として計算できる。

ii) 被覆石の安定性

Hudson (1959), Ryu and Sawaragi (1986) および Van der Meer (1987) の捨石重量算定式を最適化 algorithm への適用のために定式化するとそれぞれ次式のようになる。

$$g_1=X_5^3\gamma_r-[\gamma_r/\cot\theta\{K_D(S_r-1)^3\}]\cdot H_{1/3}^3\geq 0 \\ \dots\dots\dots (7)$$

$$g_1'=X_5^3\gamma_r-\left[\frac{\gamma_w(6.15Q_P+20.0)}{\gamma_r^{1/3}(D_R+30.1)}\right]^{3/2}H_{1/3}^3\geq 0 \\ \dots\dots\dots (8)$$

$$g_1''=X_5^3\gamma_r-\frac{\xi_z^{3/2}}{[6.2P^{0.18}(D_V/\sqrt{N})^{0.2}]^3} \\ \times \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{(S_r-1)^3}\geq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$=X_5^3\gamma_r-\frac{1}{[P^{-0.13}(D_V/\sqrt{N})^{0.2}(\cot\theta)^{0.5}\xi_zP]^3} \\ \times \frac{H_{1/3}^3\gamma_r}{(S_r-1)^3}\geq 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 γ_r は石の単位体積重量、 K_D は block の安定係数 (C.E.R.C., 1984)、 S_r は γ_r/γ_w であり γ_w は海水の単位体積重量、 ϕ は石の安息角、 Q_p は spectrum peakedness parameter、 D_R は Ryu 等が提案した被災

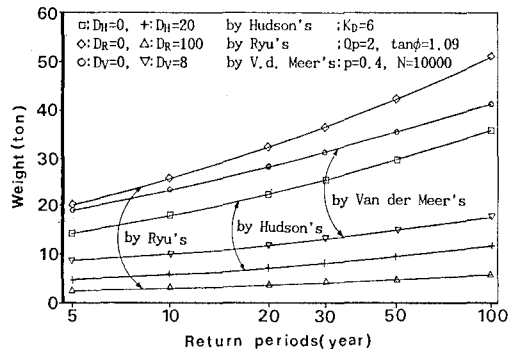


図-3 捨石重量の算定例

率, D_V は Van der Meer が提案した被災率, P は構造物の permeability, ξ_s は波の平均周期を用いて計算した surf-similarity parameter である. また式 (9) は plunging 形の碎波の時, 式 (10) は surging 形碎波時に適用する式である. これらの式に前述した式 (3), (4) から求めた外力特性を考慮して捨石重量の変化を比較せしめたものが図-3 である. ここで3つの捨石重量算定式による結果は差はあるものの比較的良好一致するといえる.

iii) 波浪制御および他の条件

構造物の機能と利用目的により越波・反射波などの水理特性の制御のための制約条件を定式化すると次のようになる.

$$g_2 = AQ - Q \geq 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$g_3 = AR - K_r \geq 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに,

$$Q = 0.5a(R_u - H_c)^2(X_0/R_u - \cot \theta) \quad \dots\dots\dots (11)'$$

$$a = 7.6(\cot \theta)^{0.73}(H_0/L_0)^{0.83} \quad \dots\dots\dots (11)''$$

$$R_u = [1.17\xi_{1/3}/(1 + 0.8\xi_{1/3})] \times H_{1/3} \quad \dots\dots\dots (11)'''$$

$$K_r = 0.5 \left[\frac{\xi_{1/3} - 2.65 \tan \theta}{4.3} \right]^{0.7} \quad \dots\dots\dots (12)'$$

ここに, R_u は run-up 高, H_c は天端高, $X_0 = 1/4$ 波長, $\xi_{1/3}$ は有義波に対する ξ , AQ は許容越波量, AR は許容反射率, Q , K_r は各各越波量と反射率である.

これら以外の天端幅, 斜面の安定などに対して必要に応じて定式化して設計変数を増加したりすることができる.

4. 費用評価および費用最適化

4.1 初期建設費 (CI) 算定

初期建設費は工事現場の特性により異なるが, ここでは各部の断面積に加重値を与えた次式から求めることにした.

$$CI = \alpha_a A + \alpha_b B + \alpha_c C \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに, A , B , C は各各被覆層, filter 層, core 部の断面積であり, α_a , α_b , α_c はそれぞれの加重値である.

4.2 被災補修費

波浪による年間被災発生確率 (dF) は被災を生ずる極値波浪の年間発生確率 (Δp) と関係するから次のように表現することができる.

$$dF = (1 - (1 - \Delta p)^\lambda) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに, λ は年間利用資料数である.

一方, 極値外力に対する構造物の被災補修費 (FC) は

$$FC = \alpha_f (D_r \times CC) \quad \dots\dots\dots (15)$$

により考慮する. ここに, α_f は被災部分の初期建設費 (CC) に対する補修時の加重値である. D_r は等価破壊率である. 式 (14), (15) から, 年間総補修費 (TMY)

は次のように計算することができる.

$$TMY = \int_{R_{PL}}^{R_{PU}} (FC \times dF) dRP \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに, R_{PU} , R_{PL} は各各考慮すべき外力の再現期間の上・下限値, dRP は RP の計算間隔である.

4.3 費用最適化

構造物の耐久年数に発生する総費用 (TC) は図-4 に示したように建設費と補修費の合により求められる. ここで被災補修費を現在価値 (CCF) に換算して表現すると次式になる.

$$TC = CI + CCF \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$CCF = TMY \times P_{wf} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$P_{wf} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに, P_{wf} は現価換算係数, i は割引率, n は構造物の耐久年数である.

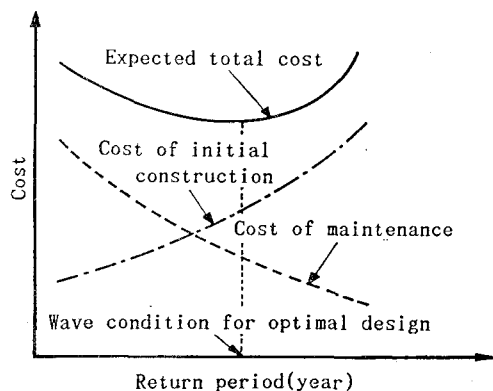


図-4 防波堤の費用最適化概念図

5. Algorithm の適用例

5.1 設計外力及び基本条件

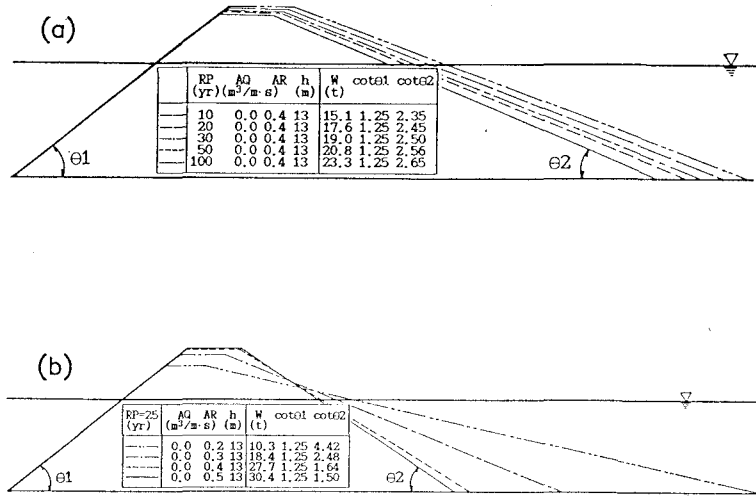
外力条件は韓国東海岸で観測した data の式 (6) による解析結果得られた次式を用いる.

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 1.01RV + 1.93 \\ T_{1/3} &= 2.50RV + 6.66 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

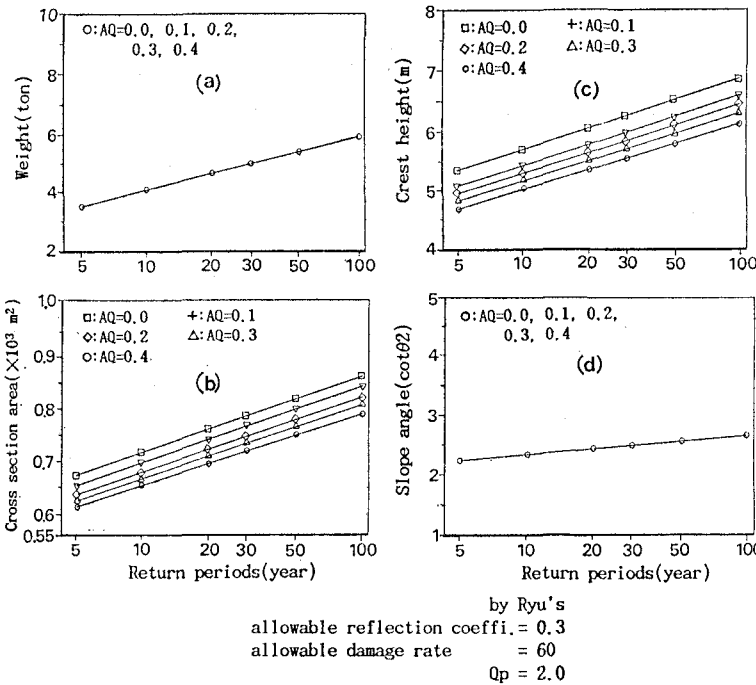
そのほかの条件は韓国G港の条件を準用する. また, $\alpha_a = 9.4$, $\alpha_b = 3.4$, $\alpha_c = 1$ とする.

5.2 設計条件の変化による設計断面の変化特性

式 (20) から求められる再現周期別の外力因子を用いて, 本研究で提案した設計 algorithm を適用して代表的な断面変化を示したのが図-5 の (a), (b) である. 図-5 の (a) は設計外力の選び方により変化する断面特性を示したものであり, (b) は許容反射率による断面変化を図で示したものである. 条件の変化により得られる断面諸元と被覆石重量は図面内に記されているとおりである. ここで, 許容反射率の変化による断面変化は



図—5 設計条件の変化による断面変化の一例



図—6 許容越波量 (AQ) による設計断面の変化の一例

非常に敏感であることが認められる。また、設計外力の再現期間の変化による断面変化は主として被覆層の重量変化と関係してくると考えられる。図—6 は許容越波量を $AQ=0$ から 0.4 まで考慮した設計計算結果を示したものである。この計算は許容反射率 $AR=0.3$ 、 $Q_p=2.0$ 、 $D_R=60$ の条件で Ryu and Sawaragi (1986) の捨石重量算定式を用いた結果である。この図からわかるように、許容越波量の変化によって敏感に変化する設計変

数は天端高 (H_c) であり、主としてその効果により構造断面積が増大するものと考えられる。この現象から構造物斜面上の run-up の制御は H_c を低くするうえで最つとも重要であり費用にも大きく影響することがわかる。

図—7 は不規則波のスペクトル型による影響が考慮できる設計式 (Ryu and Sawaragi, 1986) を用いて spectrum-peakedness parameter Q_p の変化による設計断面積の変化 (b) と被覆石の重量 (a) の変化を示したものである。ここで、 Q_p の変化によってかなりの断面と石の重量の変化が生じることが認められる。

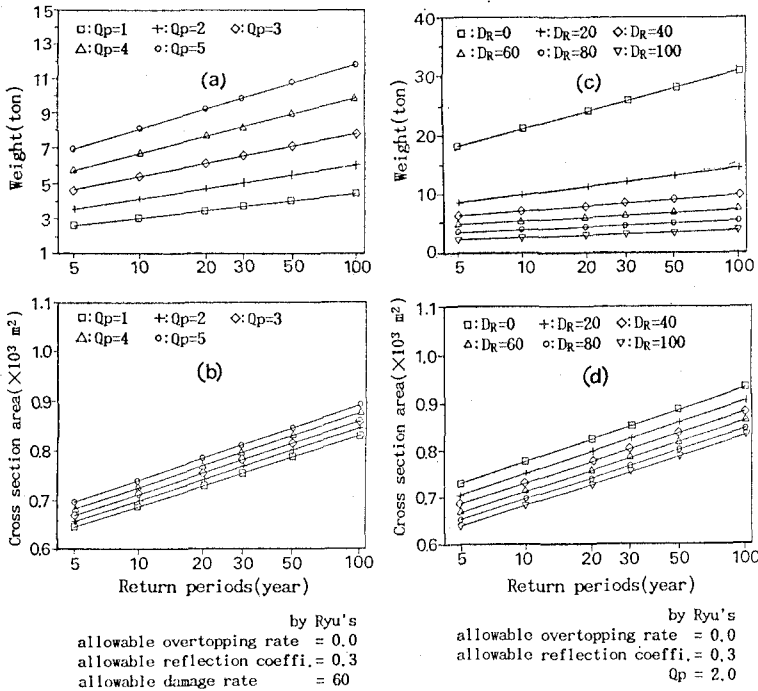
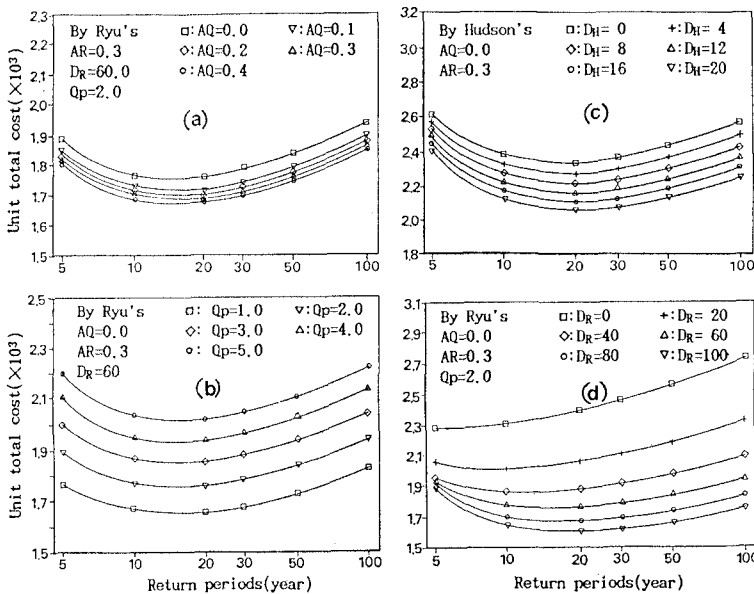
また、許容破壊率 (被災率) D_R の変化による石の重量の変化と構造断面積の変化も無視できないことがわかる。

5.3 費用の変化特性

5.2 で議論したように設計条件の変化による断面変化は非常に敏感なものである。なお図—6、図—7 にも確に表わされているように外力の再現期間を如何にするかにより変化が大きく出て来る。これらの傾向をもって費用最適化 algorithm から求められる費用特性の変化を示したのが図—8 である。図—8 の (a), (b),

(c), (d) はそれぞれ AQ, Q_p, D_H, D_R の変化による総費用の変化を示した 1 例である。ここに D_H は Hudson (1959) または C.E.R.C. (1984) が定義している被覆率である。この図からわかるように最小費用を示す再現期間の外力が存在する。また、この傾向は設計条件による差は大きくないが、TC (総費用) の差は顕著になっていることがわかる。

これは本研究で提案している 費用最適化設計 algo-

図-7 Q_p と D_R の変化による断面変化の一例図-8 AQ , Q_p , D_R , D_H の変化による総費用の変化

できる方法になるとともに、従来の設計方法による計算結果を SUMT 法の初期値として利用するようになっているからその比較も容易である。

6. 結 論

以上の論議のように極値外力の分布特性を考慮して安定性と波浪制御機能をも導入して、従来の方法と最適化技法を利用した捨石式海岸構造物の費用最小化設計 algorithm を開発してその特性を例をもって説明した。また、設計波の決定方法を改善して極値分布を導入することになっているから設計波決定による問題を低減することができる長点をもった algorithm と考える。

今後はこの algorithm の利用範囲を拡げるために構造形式の多様化、波浪制御機能の精度を高める方法を考えていきたい。

参 考 文 献

- 高田 彰 (1973): 波の打上げ空間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文集, 212, pp. 25-39.
- C. E. R. C. (1984): Shore Protection Manual, Vol. II, U. S. Army, C. E. R. C., pp. 7. 202-243.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 85, pp. 93-121.
- Ryu, C. R. and T. Sawaragi (1986): A new design method of rubble mound structures, Proc. 20th ICCE, ASCE, pp. 2188-2202.
- Smith, O. P. (1987): Cost effectiveness of breakwater cross section, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 113, pp. 447-460.
- Van der Meer (1987): Stability of breakwater armor layer—design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.

algorithm の適用性が認められることである。特に従来の設計において設計外力の選び方が意外に大きく設計諸元に影響を与えたが、この設計 algorithm はその問題も解決