

不規則波에 대한 人工REEF의 越波 低減 效果 및 스펙트럼 形狀과 越波量과의 關係

Effects of Artificial Reef on Reduction of Irregular Wave Overtopping
Volume and Relationships between Overtopping and Spectral Band Width.

朴 相 吉
Park, Sang Kil

Abstract

In the past, seawall and seadike very higher than sea-water elevation had been constructed mainly to prevent the wave overtopping volume. However, the coastal zone is recently developed for the multipurpose of not only preventing from the coastal disaster but conserving the coastal environment and utilizing the coastal space. In this sense, this paper deals with the artificial reef being able to reduce the overtopping volume. Relations of the overtopping volume to the breaking wave are briefly reviewed theoretically, and fundamental factor affecting it are also obtained experimentally from the artificial reef with the irregular waves, In addition, the numerical simulation is developed to investigate the effects of spectral band width for the overtopping volume. The most effective artificial reef section to reduce the overtopping volume is proposed.

要 旨

高波浪이 來襲하여 既存護岸으로서는 防災 效果가 없을 경우, 既存護岸 前面에 人工reef를 設置하여, 海岸防災와 海岸環境 保存 및 海岸利用을 同時에 갖는 多目的 海岸空間開發이라는 趣旨에서 本 研究를 遂行 하였다. 人工reef를 固定床으로 制作하고, 不規則波에 對한 實驗과 既存理論을 導入하여 越波量과 碎波率과의 關係를 밝혔다. 스펙트럼形狀이 越波量에 미치는 影響을 糾明하기 위하여 數值simulation을 실시했다. 스펙트럼 形狀으로부터 波高와 週期の 結合 確率密度 分布를 作成하여 人工reef의 諸斷面이 越波量을 低減 시킬 수 있는 最適斷面을 提示하였다.

1. 序 論

最近 越波와 海岸浸蝕 等에 대한 海岸 防災뿐만

*正會員 · 釜山大學校 工科大學 土木工學科 助教授

아니고, 親水性 海岸의 造成이라는 海岸利用의 見地에서도 面的防禦工法이 注目을 끌고 있다. 이런 研究는 國土가 매우 狹小한 海岸國家(日本)에서 進行中에 있으며, 몇개의 現地實驗을 위한 施工例가 있고, 現在는 全國의인 海岸에 計劃되고 있다. 面的防禦體系(zonal protection system)의 施工構造物으로서는 深海 領域에 潛堤를 設置하고 潛堤 背後에 人爲的으로 모래를 投入하여 人工 養濱으로 構成된 人工reef가 代表的인 構造物이다.

이러한 構造物을 對象으로 하여 規則波를 使用한, 人工reef의 越波量 低減 效果에 대한 研究는 朴, 出口, Sawaragi^(1, 2)에 의해서 밝혀 졌지만, 人工reef의 計劃斷面 諸元等을 決定할 수 있을 程度의 定量的인 研究 成果는 現在까지도 進行中에 있다. 井上⁽³⁾等은 人工reef의 長이가 越波에 미치는 影響에 대한 研究를 통하여 人工reef의 長이가 짧으면 人工reef를 設置하는 것이 危險하다고 指摘하고 있다. 이는 人工reef의 長이가 越波量에 重大한 影響을 미치고 있음을 意味 한다. 勿論 不規則波를 使用하여 研究한 結果는 아직 發表되지 않고 있다. 이러한 不規則波를 同時에 取扱하여 人工reef에 대한 越波特性을 밝히므로써 施工後의 管理 維持面에서도 큰 效果를 期待할 수 있다. 한편 面的防禦工法의 一環으로서 計劃 施工된 人工reef는 越波對策으로만 利用되는 것이 아니고 浸蝕대책을 同時에 겸한 海岸防災對策으로 施工되는 境遇가 大部分이다. 따라서 人工reef 計劃斷面 諸元의 決定에 있어서 越波對策이라는 目的만으로서는 防災側面만을 內包하고 있으므로 海岸을 利用하자는 利用 側面을 同時에 考慮한 設計가 가장 바람직 하다고 하겠다. 그럼에도 불구하고, 本 研究에서는 來襲하는 高波浪을 最優先的으로 深海域에서 遮斷하고자 하는 趣旨下에서 人工reef를 越波對策 側面에서 不規則波에 對한 人工reef의 越波量 低減效果를 明確히 하고 人工reef의 最適 設計計劃을 위하여 有效한 基礎資料를 提供하는 것을 目的으로 한다.

2 스펙트럼으로부터 波高와 週期の 結合分布 變換法과 妥當性

人工reef의 越波量 低減效果를 明確히 하기 위해서는 一般性을 갖는 많은 實驗과 現地資料를 必要로 한다. 또 스펙트럼形狀과 越波量과의 關係를 決

定하기 위해서는 基本理論을 바탕으로 하여 스펙트럼形狀으로부터 구할 수 있다. 波高와 週期の 結合分布가 精度 높은 變換이 可能할 경우에는 스펙트럼 形狀만을 入力시켜서 不規則波의 越波量을 豫測하는 것이 可能하다. 이는 水理實驗을 하지 않고도, 스펙트럼形狀과 越波量과의 關係를 구할 수 있다.

2.1 스펙트럼으로부터 波高와 週期の 結合分布를 구하는 變換法

不規則波의 스펙트럼 形狀을 가지고 波高와 週期の 結合分布로 變換하는 方法에 관한 研究가 最近 여러 곳에서 進行되고 있다. 스펙트럼 幅이 좁은 理論에서 始作한 Longuet-Higgins^(4,5) 方法과 修正法, 水位 變動이 Gaussian 分布를 따른다는 水口의 方法⁽⁶⁾ 週期の 確率分布가 T²-Rayleigh 分布를 따른다는 Battjes의 方法⁽⁷⁾ 三次元 Weibull分布를 使用한 木村方法⁽⁸⁾ Longuet-Higgins의 方法을 스펙트럼幅이 넓은 理論으로 改良한 渡邊方法⁽⁹⁾ 등이 있다.

그러나 이들 提案方法은 一長一短이 있으며 아직 이런 問題를 解決하기 위한 決定的인 方法은 提案되지 않고 있다. 여기에서는 Longuet-Higgins의 方法을 改良하고 스펙트럼幅에 關係없이 使用할 수 있는 渡邊方法을 使用하기로 한다.

Longuet-Higgins는 一連의 不規則波群의 平均 波高를 \bar{H} , 平均週期를 \bar{T} 로 두고, 波高比 $x=H/\bar{H}$ 와 週期比 $\tau=T/\bar{T}$ 의 結合分布 $P(x, \tau)$ 를 다음 式으로 表現하고 있다.

$$P(x, \tau) = \frac{\eta x^2}{4\nu} \exp\left[-\frac{\eta x^2}{4} \left(1 + \frac{(\tau-1)^2}{\nu^2}\right)\right] \quad (1)$$

여기서 ν 는 다음式으로 주어지는 스펙트럼의 폭(Spectral band width)을 나타내는 계수이다.

$$\nu = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_2}{\mu_1^2}} - 1 \quad (2)$$

$$\mu_k = \int_0^\infty S(f) f^k df \quad (3)$$

여기서 $S(f)$ 는 周波數 스펙트럼이다.

式(1)의 分布는 $\tau=1$ 에서는 對稱이며 x 와 τ 의 相關은 없다. 따라서 式(1)로는 스펙트럼의 폭이 넓은 波高와 週期の 結合分布를 表現할 수가 없다. 왜냐하면 實際바다의 波浪은 波高가 큰것은 週期도 길고, 波高가 작은것은 週期도 짧은 傾向(波形的相似性)이 있고, x 와 τ 의 相關은 결코 0은 아니기

때문이다. 式(1)에서 波高比와 週期比의 確率分布는 各各 다음式으로 주어진다.

$$P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, \tau) d\tau = \pi x / 2 \exp(-\pi x^2 / 4) \quad (4)$$

$$P(\tau) = \int_0^{\infty} P(x, \tau) dx = \nu^2 / 2 [\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2} \quad (5)$$

어떤 週期比 τ 를 갖는 波浪의 波高比 分布는 다음式으로 쓸 수 있다.

$$P(x, \tau) = P(x, \tau) / P(\tau) = A x^2 \exp(-B x^2) \quad (6)$$

여기서 A, B는 다음과 같다.

$$A = \pi [\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2} / 2 \nu^3$$

$$B = \pi [\nu^2 + (\tau - 1)^2] / 4 \nu^2 \quad (7)$$

여기서 週期別 成分波의 平均波高를 고려하여 어떤 週期比 τ 를 갖는 成分波의 平均波高를 $H_m(\tau)$, 波高比를 $X_m(\tau) = H_m(\tau) / \bar{H}$ 로 表現하면, 式(6)에서 式(8)로 된다.

$$X_m(\tau) = \int_0^{\infty} x P(x, \tau) dx = \frac{4\nu}{\pi [\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

週期別 波高分布를 表現하기 위하여 새로운 X_i 를 다음式으로 定義한다.

$$X_i = \frac{H}{H_m(\tau)} = \frac{H}{\bar{H}} \frac{\bar{H}}{H_m(\tau)} = \frac{X}{X_m(\tau)} \quad (9)$$

τ 를 包含하지 않는 週期別 波高 分布를 表現하면 式(10)이 된다.

$$P(X_i / \tau) = P(X_i / \tau) dX_i / dX_i = 32 X_i^2 / \pi^2 \cdot \exp(-4 X_i^2 / \pi) \quad (10)$$

渡邊等⁽⁹⁾은 實驗에 周波數別 平均波高 $H_m(f)$ 를 구하고, 이것과 Longuet-Higgins의 式(8)에서 求할 수 있는 $H_m(f)$ 와 比較한 結果 周波數의 幅이 넓게 됨에 따라서 誤差가 크게 되는 것을 指摘하고, 다음 關係式이 成立하는 것을 알았다.

$$H_m(f) \propto \sqrt{S(f) f} \quad (11)$$

式(5)에서 주어진 週期分布 $P(\tau)$ 는 $\tau < 0$ 에서도 陽의 값을 취하고, $\tau > 0$ 範圍의 積分값은 다음과 같다.

$$\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau = 1/2 (1 + 1/\sqrt{1 + \nu^2}) < 1 \quad (12)$$

그런데 $P(\tau) d\tau = 1$ 을 滿足하고, 스펙트럼의 폭이 좁은 영역(Narrow spectral band region)의 式(5)와 一致시키기 위한 다음式을 誘導했다.

$$P(\tau) = \frac{\sqrt{1 + \nu^2}}{1 + \sqrt{1 + \nu^2}} \frac{\nu^2}{[\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}} \quad (13)$$

渡邊等⁽⁹⁾은 波高와 週期の 結合確率密度 $P(x, \tau)$ 를 式(6)와 式(10)에서 다음式으로 定理했다.

$$P(x, \tau) = P(\tau) \cdot P(X_i / \tau) / X_m(\tau) \quad (14)$$

式(14)의 右邊中 $P(\tau)$ 에 관해서만 式(13)을 近似的으로 使用하는 것이 可能 하지만 $X_m(\tau)$ 는 式(11)의 關係를 使用하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X_m(\tau) = H_m(\tau) / \bar{H} = a \sqrt{S(f) f} / \bar{H} \quad (15)$$

여기서 比例常數 a 의 값은 $X_m(\tau)$ 가 $X_m(\tau) P(\tau) d\tau = 1$ 이 되는 關係를 滿足해야 한다는 條件을 使用하면 다음式으로 評價할 수 있다.

$$a = \bar{H} / \int_0^{\infty} \sqrt{S(f) f} P(\tau) d\tau \quad (16)$$

以下에서 波高와 週期の 結合 確率 密度分布인 $P(x, \tau)$ 는 式(14)의 右邊의 各項을 式(10), (13), (15), (16)로 計算이 可能하다.

2.2 變換法의 妥當性에 대하여

渡邊方法⁽⁹⁾을 利用하여 本 實驗에서 얻어진 深海波의 스펙트럼形狀으로 부터, 波高와 週期 結合分布의 變換을 實施했다. 入力 스펙트럼形狀으로서 深海中에서 주어진 時系列에서 求한 스펙트럼形狀은 그림 1과 같다. 그림(1)을 利用하여 얻어진 波高와 週期の 結合分布를 그림 2에 表示했다. 縱軸에는 波高 H (cm), 橫軸에는 週期 T (sec)를 表示하였으며 그림중 숫자는 實驗에서 구한 時系列을 Zero down-crossing法에 의해서 定義된 各 波高 週期에 對應시킨 波數이다. 한편 實線은 渡邊 方法⁽⁹⁾을

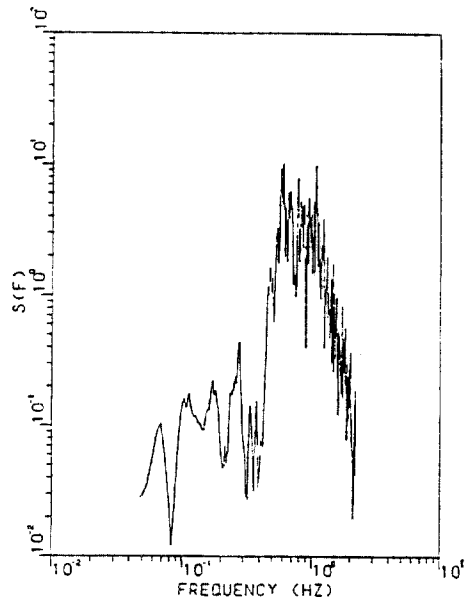


그림 1. Shape of irregular wave spectrum

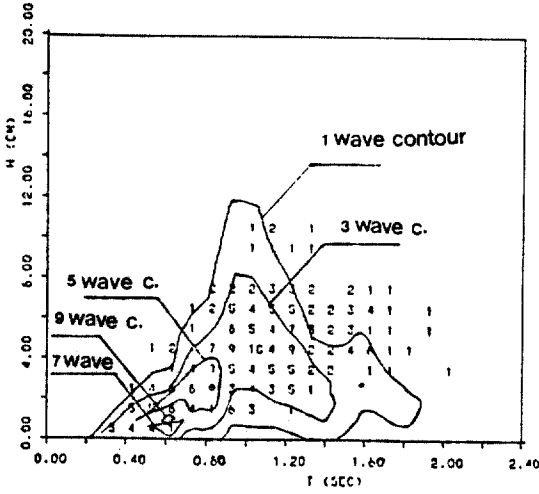


그림2. Joint distribution of wave height and period
(Calculation and experiment)

로부터 구한 計劃値이고 한개波에서 아홉개波까지 等高線으로 圖示하고 있다. 그림에서 週期가 긴 境遇에는 計劃値와 實驗値는 약간 다른 값을 보이고 있지만, 計劃값은 거의 實驗값에 接近하고 있는 傾向을 보이고 있다. 同時에 計劃에서 주어진 波高 週期의 結合分布를 가지고 越波量을 求해본 結果, 實驗에서 얻어진 時系列에서 計劃한 越波量과 거의 一致하고, 그 差는 3% 以內인 것을 알았다. 그러나 渡邊方法⁹⁾은 入力條件으로서 스펙트럼形狀外에 平均週期和 平均波高를 必要로 하고 있다. 따라서 設置條件으로서 有義波高와 有義週期가 주어질 때는 스펙트럼에서 再次 平均波高와 平均週期를 產出할 必要가 있고, 이때 Rayleigh分布의 假定이 必要로 하게 된다. Rayleigh分布는 스펙트럼幅이 좁은 領域의 假定에서 出發하기 때문에 深海波의 波高分布가 Rayleigh分布에 따르지 않을 境遇(스펙트럼의 幅이 넓은 領域의 경우)에는 誤差를 發生시킬 危險性이 매우 큰 것이 短點으로 指摘 되고 있다.

2.3 數值實驗의 概要

對象 海濱形狀은 그림3과 같은 人工reef를 設置한 海岸이며 堤防은 鉛直護岸으로하고 靜水面上의 護岸높이 H_c 는 4.0cm ($H_c/H_0=0.43$)로 했다. 人工reef가 설치되지 않는 狀態의 堤防의 先端部 設置 水深 h_{toe} 는 13.3cm이다. 人工reef의 높이 h_r 는 2, 4, 6, 8, 10 cm로 5種類를 設定했으며, 人工reef의 幅 B는 50,

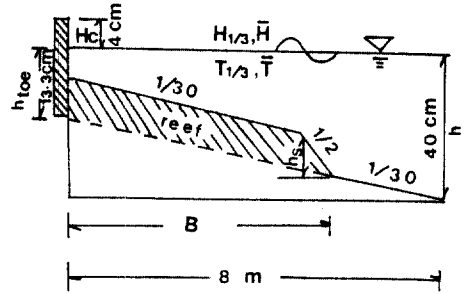


그림3. Shape of beach (artificial reef)

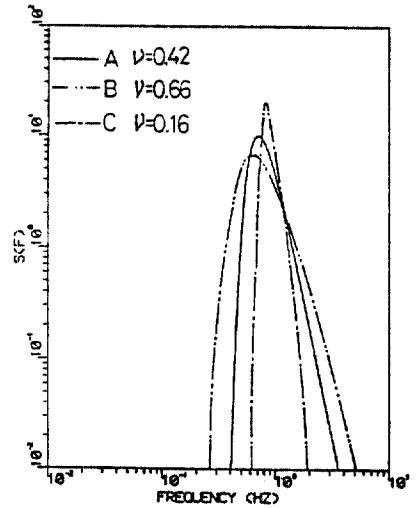
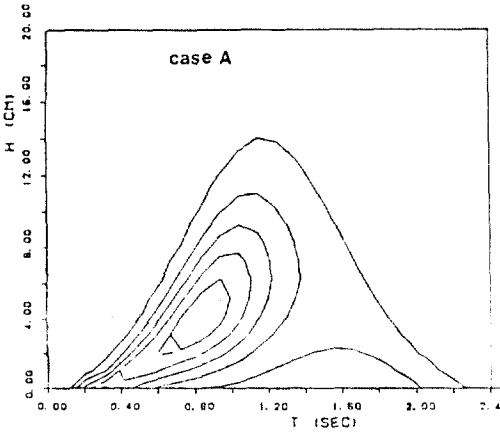


그림4. Shape of spectrum according to spectrum width parameter.

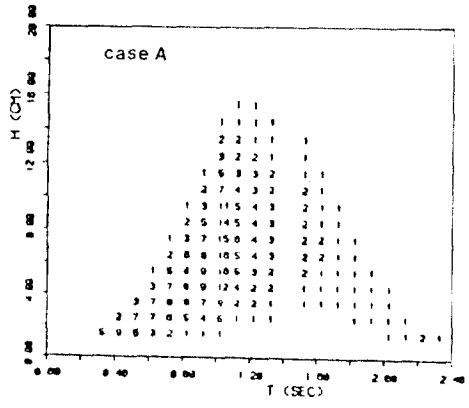
100, 150, 200, 250cm로 했다. 無次元量 $h_r/h_{toe}=0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, B/L_{s1}=0.22, 0.44, 0.66, 0.88, 1.10$ 이다. 여기서 L_{s1} 는 入射波의 有義週期の 波長이다. 入力스펙트럼의 條件은 다음 式으로 주어지는 不規則波를 對象으로 한다.

$$S(f) = S_p (f/f_p)^{-m} \exp\{m/n[1 - (f/f_p)^{-n}]\} \quad (17)$$

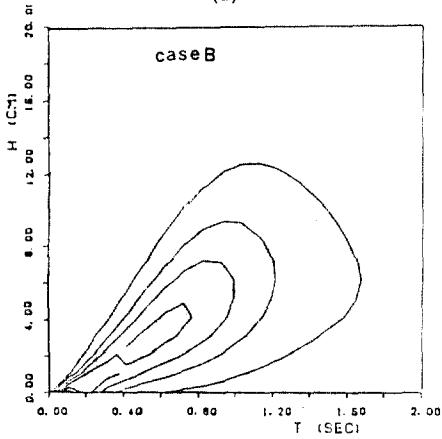
여기서 $S(f)$ 는 周波數스펙트럼의 密度, S_p 는 피크(peak)스펙트럼의 密度, f_p 는 피크 周波數, m, n 은 스펙트럼의 形狀係數이다. 一般적으로 風波에 대해서는 $m=5, n=4$ 가 適合하다고 한다. 本研究에서는 스펙트럼의 幅과 越波量의 關係를 분명히 하기 위하여 表1에 表示한 3가지의 스펙트럼을 選擇하여 數值實驗을 했다.



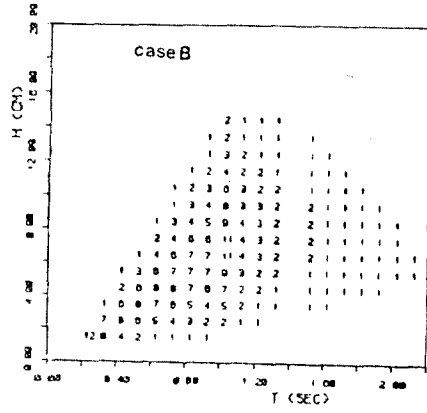
(a)



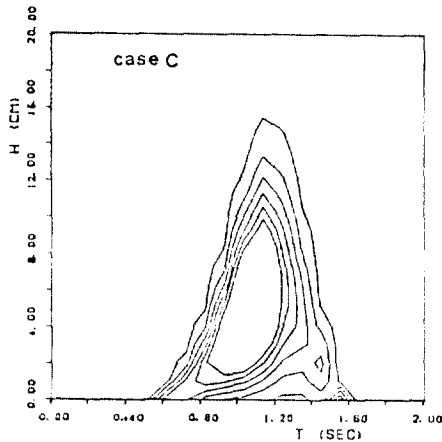
(b)



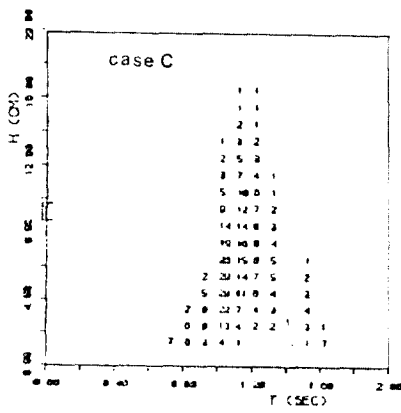
(a)



(b)



(a)



(b)

그림5. Method of transformation wave height and period according to Wadanabe method

표 1. Elements of spectrum

case	m	n	Sp	f _p	ν	Q _p	N _w	\bar{H} (cm)	\bar{T} (sec)	H _{1/3} (cm)	T _{1/3} (sec)	Remark
A	5.0	4.0	10.0	0.7	0.42	2.00	4.59	5.73	1.05	9.36	1.21	Bretschneider Pierson-Moskowitz
B	4.0	2.0	7.2	0.6	0.66	1.27	4.51	5.81	0.94	9.36	1.21	A 경우보다 스펙트럼 폭이 넓은 경우
C	10.0	8.0	19.9	0.78	0.16	4.30	4.66	5.82	1.16	9.36	1.21	A 경우보다 스펙트럼 폭이 좁은 경우

3. 스펙트럼 形状과 越波量과의 關係

3. 1 自然海濱의 越波量과의 人工reef를 設置한 境遇의 越波量

數值實驗의 目的中 人工reef를 設置한 境遇의 越波量 低減效果를 明確하게 하는 것이 매우 重要하다. 그림7은 人工reef를 設置하지 않았을 때의 自然海濱에서의 越波量과 人工reef를 設置하였을 때의 越波量을 比較한 것이다. 縱軸은 人工reef를 설치한 境遇의 越波量 $q(\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm})$ 를, 人工reef를 設置하지 않은 境遇의 越波量 $q_0(\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm})$ 로서 無次元化한 것이다. 縱軸은 人工reef의 幅B를 深海有義波長 L_w 로서 無次元化한 값 B/L_w 를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 어떤 경우에도 $q/q_0=1.0$ 이하의 값을 취하며 人工reef를 設置하면 越波量이 低下하고 있다는 것을 알 수 있다.

B/L_w 가 增加함에 따라서 越波量이 減少하는 傾向이 있지만 h_s/h_{100} 가 0.3以下에서는 이와같은 傾向이 보이지 않는다. 특히 h_s/h_{100} 가 增加할 수록 $B/L_w=0.2$ 까지의 減少率은 크게 나타나고 있다. 따라서 人工reef를 設置할 境遇, 經濟的인 側面과 海岸을 慰樂空間으로 利用한다는 側面에서 許容된 된다면 人工reef의 높이를 될수 있는 한 높게 함으로서 越波量의 低減效果를 크게 期待할 수 있다. 여기에 反하여 人工reef를 設置한 境遇와 設置하지 않은 境遇의 堤防의 先端部 設置 水深을 利用해서 畝田의 期待 越波流量 算定法⁽⁹⁾을 適用하면 畝田의 方法에서 q 의 값이 算定 可能하고, h_s/h_{100} 가 0.45 以下의 境遇에는 q/q_0 가 거의 0.7로 되기때문에 이 領域에서는 畝田의 方法을 適用해도 非經濟的인 設計는 아니라고 推測된다. 人工reef를 設置한 境遇와 設置하지 않은 境遇를 比較해서 人工reef를 設置하는 것이

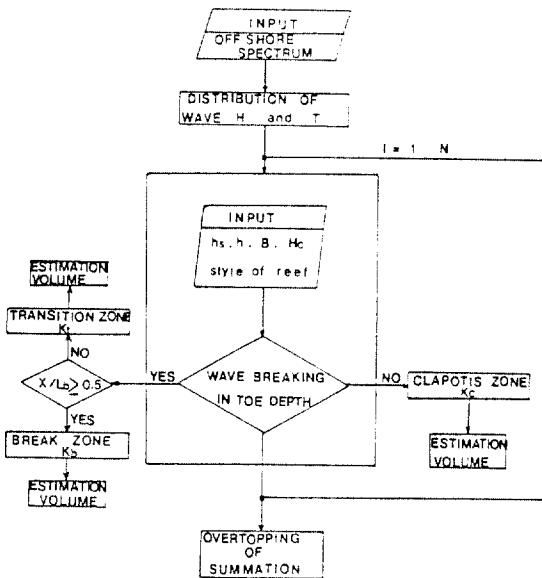


그림 6. Flow chart of calculation for irregular wave overtopping volume

여기서 Q_p 는 尖銳度, N_w 는 總波數 \bar{H}, \bar{T} 는 平均波高와 平均週期, $H_{1/3}, T_{1/3}$ 의 有義波의 波高와 週期이다. 그림4는 각 스펙트럼 形状을 나타낸다. 스펙트럼 形状의 決定은 深海波의 $H_{1/3}$ 과 $T_{1/3}$ 를 3種類 모두다 同一하게 하였다. 그림5의 (a)는 各各의 스펙트럼에 對應한 確率密度, (b)는 스펙트럼을 波數로 變形시킨 結果를 나타내고 있다. 數值實驗은 各各의 스펙트럼 形状에 대하여 h_s 와 B를 變化시켜 가면서 計算한 75cases, 人工reef를 無限대로 延長할 境遇의 15case, 人工reef를 設置하지 않을 境遇의 3case, 總計 93case에 대하여 數值實驗을 實施 했으며, 越波量은 그림6의 流通圖를 使用해서 計算했다.

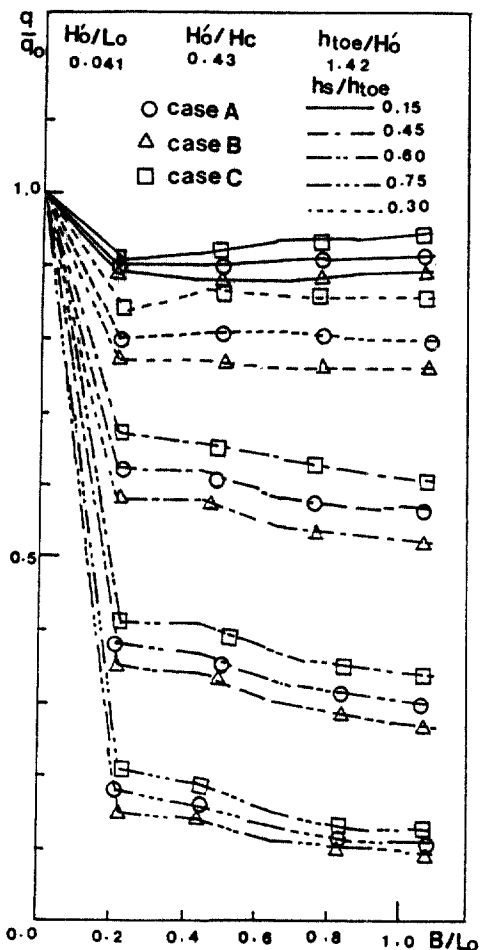


그림7. Comparison between natural beach and artificial reef for wave overtopping rate due to spectrum shape

越波량이 減少하고 있지만, 規則波를 使用한 井上의 實驗³⁾에서는 人工reef를 設置함으로써 逆으로 越波량이 增加하는 境遇가 있다고 指摘하고 있다. 이는 人工reef의 諸元에 關係 되는 것으로 人工reef의 幅 B/L_{0i} 가 0.1以下の 實驗에서는 越波량이 增加하고 있음을 알 수 있고, 同時に 堤防의 先端部 設置水深 $h_{toe}=0$ 의 境遇에 限해서 實驗한 結果值이다.

32 人工reef의 幅과 높이가 越波량에 미치는 影響

人工reef를 設置할 경우, 人工reef의 諸元中 幅(B)과 높이(h_r)가 越波량에 미치는 影響이 가장 크다. 그림 8은 人工reef의 높이와 越波량의 關係를 示한 것이다. 그림에서 h_r 가 增加함에 따라서 越波량

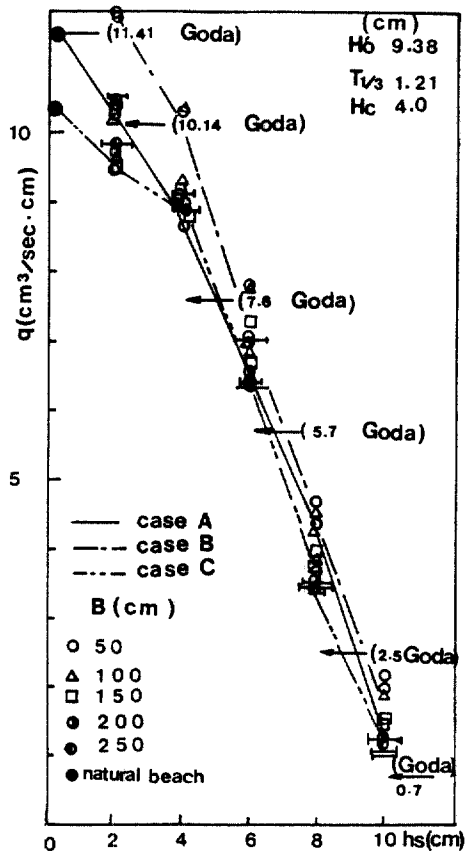


그림8. Relationships between wave overtopping volume and height of artificial reef

은 急激히 減少하고 있다. 따라서 越波량의 低減에는 其他의 條件이 同一 하다면 人工reef의 높이 h_r 를 높게하는 것이 效果가 크다고 할 수 있다. 同時에 h_r 가 增加함에 따라서 서서히 人工reef幅이 效果가 增加하고 있음을 알 수 있다. 結局 h_r 가 적을 때는 人工reef의 幅을 延長해도 效果가 거의 없다는 것을 意味한다. 그림에서 화살표는 人工reef를 設置한 境遇의 堤防의 先端部 設置水深을 利用해서 合田의 期待 越波流量 算定式¹⁰⁾을 利用해서 計算한 結果이다. 人工reef를 設置 하지않은 境遇는 本數值實驗 結果와 合田의 方法¹⁰⁾은 어느 정도 一致한다고 본다. 그러나 h_r 가 增加함에 따라서 合田의 方法¹⁰⁾은 過小評價가 되며, 이 差의 比率이 h_r 가 增加함에 따라서 크게 나타나고 있다. 即, 人工reef를 設置한 後, 堤防의 先端部 設置水深을 利用해서 合

田의 방법⁽⁹⁾을 適用하는 것은 結局 人工reef를 無限大로 延長한 境遇의 越波量을 推定하는 것이다. 따라서 合田方法⁽⁹⁾의 過小評價 原因은 優先 人工reef를 有限한 것인가? 無限한 것인가?의 差에 起因한다. 또 h_s 가 增加함에 따라서 差의 比率이 增加하는 것은 合田의 方法은 不規則波群의 한波 한波가 碎波한 것인가? 非碎波한 것인가? 등의 波浪特性의 情報가 無視되었다. 이러한 波浪特性을 考慮한 情報를 提供하여 越波量을 算定하는 方法을 Park, 등⁽¹⁰⁾이 提示하였다. 그림9는 人工reef의 幅과 越波量을 關係를 圖示한 것이다. 縱軸은 有限의 人工reef를 設置한 境遇의 越波量 $q(\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm})$ 를, 人工reef를 無限大로 延長시킬 境遇의 越波量 $q_0(\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm})$ 로서 無次元化한 값이다.

橫軸에는 人工reef의 幅 B 를 有義波의 波長으로서 無次元化한 B/L_{s1} 를 나타낸다. 縱軸의 값이 1.0인 境遇는 人工reef의 幅 B 를 無限大로 延長한 境遇의 越波量을 나타낸다. 어느 境遇에 대해서도 B/L_{s1} 가 增加함에 따라서 q/q_0 가 減少하며 人工reef의 幅을 길게하면 越波量 低減效果가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 h_s/h_{toe} 의 값이 0.15, 0.30의 境遇는 B/L_{s1} 의 값이 增加 하더라도 q/q_0 가 거의 1.0에 가까운 값을 취하므로 人工reef의 幅을 길게해도 越波量 低減效果가 없다는 것을 알

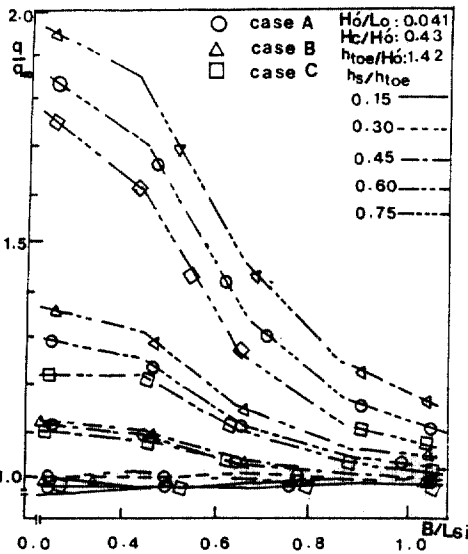


그림9. Relationships between wave overtopping volume and length of artificial reef

수 있다. h_s/h_{toe} 가 0.15인 境遇는 q/q_0 가 1.0을 약간 미치지 못하고 있다. 이것은 人工reef를 延長한 것의 危險性을 內包한 것을 말한다. 이 原因에 대해서는 確實한 根據를 밝히지 못했다. h_s/h_{toe} 의 값이 0.45以上에서는 人工reef幅을 延長하면 할수록 越波量의 低減效果가 있으며 이것은 人工reef를 無限大로 延長한 境遇의 越波量의 最小值를 보여주고 있다. 특히 이 傾向은 h_s/h_{toe} 가 크면 클수록 顯著한 效果가 있다.

即, h_s/h_{toe} 가 크면 B/L_{s1} 의 效果가 敏感하게 越波量에 影響을 미치기 때문에 人工reef를 無限大로 延長하는 것은 經濟上, 施工上의 側面에서 問題點이 많기 때문에 人工reef의 높이가 높을때는 許容 越波量과의 關係에서 人工reef의 幅을 慎重히 決定할 必要가 있다. 逆으로 B/L_{s1} 가 주어지면 人工reef를 設置한 境遇의 越波量이 推定可能하다.

3.3 스펙트럼幅이 越波量에 미치는 影響

스펙트럼의 幅을 나타내는 파라메타로서는 ν 가 앞에서 定義되었다. 그림10은 스펙트럼 形狀과 越波量과의 關係를 圖示한 것이다. 각가 人工reef의

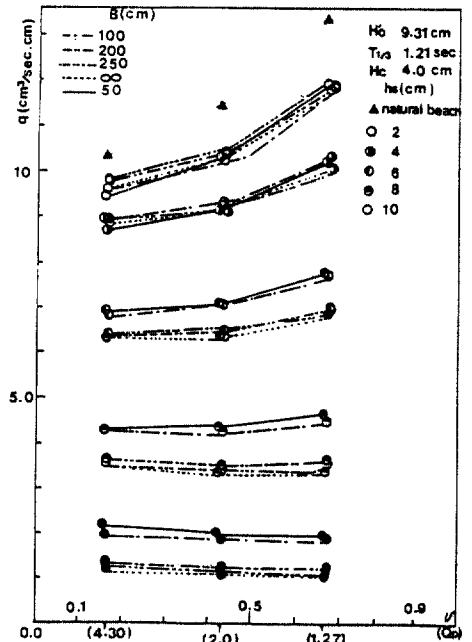


그림10. Relationships between wave overtopping rate and spectrum width parameter (spectrum steepness parameter Q_p)

幅B가 50cm, 100cm, 150cm, 200cm, 250cm, ∞를 表示한다. 縱軸은 越波量 $q(\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm})$ 를 橫軸은 스펙트럼幅(Q_p)과 파라미터(ν)를 함께 表示하고 있으며 ν 가 크면 스펙트럼幅이 넓다는 것을 意味한다. 그림에 나타난 바와 같이 人工reef를 設置하지 않은 境遇와 人工reef의 높이 h_r 가 낮고 堤防의 先端部 設置 水深이 큰 境遇는 ν 가 增加함에 따라서 越波量도 增加하는 傾向이 있으며, h_r 가 점차 커짐에 따라서 ν 에 의한 差는 점차 없어지는 것을 알 수 있다. 폭이 넓은 스펙트럼 形狀이 越波量을 增大시키는 理由를 究明하기 위해, 堤防設置位置의 波高와 週期 結合分布의 形狀과 $H_{1/3}$ 의 크기등을 調査하였지만, 이들로부터 原因을 糾明 하는데는 많은 問題點이 있다는 것을 알았다. h_r 의 높이의 差는 結局 堤防의 先端部 設置 水深을 나타내는 것이며, h_r 가 낮은 境遇는 堤防의 先端部 設置 水深이 깊다는 것을 意味한다.

堤防의 先端部 設置 水深의 大小는 碎波의 問題와 關係가 있으며, 堤防의 先端部 設置 水深이 얇아짐에 따라서 護岸에 到達하는 碎波후의 波의 比率이 높아진다. 不規則波群의 가운데서 碎波하는 波의 比率이 增加하면 深海의 스펙트럼形狀이 淺海에서는 다른 形狀으로 變化하지 않을까 생각된다.

河野等⁽¹¹⁾은 冲龜의 自然 reef海岸(深海地域에 珊瑚礁가 散在 하고 있는 海岸을 말함)을 對象으로 한 現地觀測의 結果, 自然 reef內에서 不規則波가 明確하게 reef의 형상을 變化시키는 影響力이 없다는 것을 지적하고 있는 것은 이미 reef의 先端에서 高波浪이 強制 碎波된 후 低波浪이 reef안으로 來襲하고 있음을 證明하고 있다.

一般的으로 ν 의 값이 增加하면 스펙트럼 尖銳度를 表示하는 파라메타 Q_p 의 값은 적어진다. Q_p 는 스펙트럼의 뾰족한 形狀을 表示하는 파라메타이며, Q_p 가 增加하면 일정한 크기 이상의 波高의 連續出現(length of wave group)이 增加하는 傾向이 있다. Q_p 는 다음 式으로 定義된다.

$$Q_p = 2m_0^2 \int_0^\infty f \cdot s^2(f) df \quad (18)$$

여기서, $m_0 = \int_0^\infty s(f) df$ 이다.

이 Q_p 와 越波量의 關係는 그림10에 表示한 바와 같다. 人工reef의 높이가 낮을 境遇 Q_p 가 增加함에 따라서 越波量은 減少한다. 이것은 波高의 일정값 이상의 連續 出現이 길어짐에 따라서 越波量은 減

少한다는 意味를 갖지만, 이 理由에 대해서는 確實한 根據를 糾明하지 못했다.

以上에서 深海의 스펙트럼 形狀과 越波量의 關係에 人工reef의 높이가 낮을 境遇 結局 堤防의 先端部 設置 水深이 어느정도 깊은 境遇에는 스펙트럼 形狀이 越波量에 미치는 影響이 明確하게 나타난 것을 어느 정도 알 수 있다.

合田는 期待 越波流量 算定法⁽¹⁰⁾에서 Bretschneider⁽¹²⁾와 Mitsuyasu形⁽¹³⁾의 標準스펙트럼만을 對象으로하여 計算하고 있기 때문에 스펙트럼形이 다른 곳에서의 期待 越波量을 算定하는 데는 多少의 精度差가 豫想된다. 스펙트럼 形狀의 差를 利用하여 越波量을 精度높게 算定하기 위해서는 다음 條件을 滿足 시켜야 한다. 즉 波高와 水深의 比(h_r/H_0)가 0.8정도, 比水深(h/L_{s0})이 0.03정도 以上의 水深을 갖는 領域에서 스펙트럼의 形狀이 越波量에 미치는 影響이 크다는 것이다.

4. 越波量 低減效果에 有利한 人工reef의 諸元

4.1 越波量 低減效果에 有利한 波高와 週期の 結合分布

既存의 護岸이 設置되어 있는곳의 護岸前面에 人工reef를 設置함으로써 越波量 變化를 分析하기 위해서는 人工reef의 諸元을 變化시키면서 人工reef上의 波浪特性을 調査하여 이 波浪特性에 따라서 越波量의 分布가 어떻게 變化하고 있는가를 調査하는 것이 가장 바람직하다. 波浪特性은 人工reef의 길이와 높이를 變化시키면서 人工reef에 入射하는 高波浪을 強制碎波시켜 波高와 週期の 分布形을 求하는 것이다. 規則波는 人工reef先端에서 전부 強制碎波되지만 不規則波는 入射하는 波浪을 전부 碎波시키기 위해서는 매우 높은 護岸의 築造가 必要하다. 人工reef의 目的은 될 수 있는 한 낮은 護岸으로서 越波를 防止하고 周邊을 利用하자는 것이다. 既存의 堤防前面에 人工reef를 設置함으로써 얻을 수 있는 效果 가운데 가장 重要한것은 不規則波群중의 高波浪을 強制的으로 碎波시켜 護岸에 到達하는 波群중 波高가 작은 波의 比率을 增加시키는 것이다. 여기서 人工reef의 先端에 있어서 碎波하지 않고 入射하는 波數를 N_0 로하고 이 가운데서 護岸設置點에서 碎波한 波數를 N_b 로 하면 人工reef에 의해서 強制碎波시킨 波群의 碎波率 B_s 는 다음式으로 表示된다.

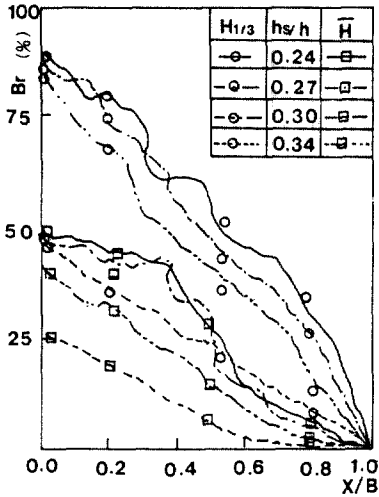


그림11. Transformation of wave breaker rate due to the length of artificial reef

$$B_r = (N_b/N_{N_b}) \times 100 \quad (19)$$

碎波率 B_r 에 影響을 주는 人工reef의 要素는 다음과 같다.

$$B_r = f(h_s/h, B/L_{si}) \quad (20)$$

이 B_r 를 求하는 데는 人工reef의 先端에서 實驗的으로 式(19)中の N_{N_b} 를 求하기가 힘들기 때문에 本 研究에서는 그림3의 人工reef 先端部分을 通過하는 곳의 波高와 週期の 結合分布의 計算結果를 N_{N_b} 로 한다. 卽, 基準波高 H^* ($H^* = H_{1/3}$, $H^* = \bar{H}$)을 設定하고 實驗에서 求한 波高와 週期の 結合分布를 使用한다. 人工reef의 先端部 設置水深에서 基準 波高 H^* 보다 큰波의 總波數를 N_{N_b} 라 하고 이 N_{N_b} 와 人工 reef上의 任意 水深에 碎波한 波의 波數 N_b 를 求하여 碎波率을 다음式으로 定義한다.

$$B_r = (N_b/N_{N_b}) \times 100 \quad (21)$$

그림11은 人工reef의 全長을 1로하고 reef上의 各 水深에 대한 碎波率의 變化를 나타낸 것이다. 縱軸은 碎波率 B_r (%), 橫軸은 reef先端部 設置水深을 基準으로 하고 人工reef上의 波高測定距離 x 를 10cm 間隔으로 해서 이 x 를 全長 B 로서 無次元化했다. 平均波高 및 有義波高의 碎波率은 水深이 減少함에 따라서 增加하는 것을 알 수 있다. 한편 h_s/h 가 0.24, 0.27, 0.30은 $X/B=0.5$ 까지는 碎波率은 緩傾斜로서 變化하지만 $X/B > 0.5$ 의 領域에서는 碎波率은 크게 增加

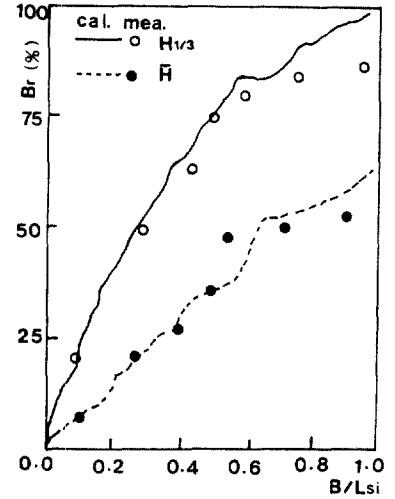


그림12. Relationships between wave breaker rate and to length of artificial reef

한다. 그러나 $h_s/h=0.34$ 는 碎波率의 變化가 緩慢한 傾斜를 이루고 있는 것을 알 수 있다. 이 碎波率 B_r (%)와 B/L_{si} 와의 關係를 調査한것이 그림12이다. 實線은 $H^* = H_{1/3}$, 點線은 $H^* = \bar{H}$ 를 表示한다. 勿論 實線 및 點線은 그림5의 (b)에서 求한 計算값이며 圓은 各 地點에서 測定한 實驗值의 碎波率이다. 計算값은 B_r 가 增加함에 따라서 거의 同一한 기울기로서 增加하지만, 實驗值은 B/L_{si} 의 값이 0.5까지는 急傾斜로서 增加하지만 $B/L_{si} > 0.5$ 의 領域에서는 增加率이 緩慢한 기울기로서 增加하고 있다. 특히 $H_{1/3}$ 과 B/L_{si} 가 0.45부근에서는 碎波率이 80%를 보이지만 B/L_{si} 가 0.25부근에서 25%에 머물고 있다. 이것은 人工reef길이 B 가 매우 짧기 때문에 人工reef先端에 入射한 高波浪이 碎波를 하지않고, 護岸設置 地點까지 到達하고 있는 것을 意味한다. 以上과 같이 碎波點의 概念을 導入하면 人工reef의 幅과 높이가 碎波率을 左右하게된다. 따라서 越波量 低減에 有利한 波高와 週期 結合分布形은 高波浪과 長週期波가 될 수 있는 한 包含되지 않는 波高 週期 結合分布形이 가장 理想的 이다.

4.2 越波量 低減效果에 有利한 人工reef形狀과 設置水深

碎波率이 越波量에 미치는 影響을 調査하여 明確한 關係가 있으면 碎波率을 制御할 수 있는 人工

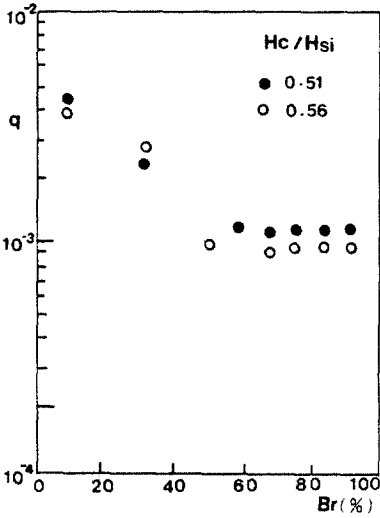


그림13. Relationships between wave overtopping rate and wave breaker rate

reef의 形狀과 設置水深등을 求하는 것이 碎波率 低減效果에 크게 寄與하는 것이다. 그림13은 縱軸에 實驗과 計算에서 求한 無次元 越波量을 橫軸에 碎波率을 表示하고 있다. 無次元 越波量 q 는 碎波率이 크게되면 어느정도 급하게 減少 하지만, 碎波率이 60-70%정도에 달하면 越波量 變化는 보이지 않는다. 이는 人工reef先端에서 碎波된 波浪의 一部가 어느정도 人工reef上을 進行함에 正弦波로 再生되는 意味를 갖고 있으며, 이 再生된 再生波(stable wave)가 越波量에 큰 寄與를 하고 있다고 생각된다. 그러나 이 再生波에 대한 確實한 機構(mechanism)는 現在로선 糾明되지 않고 있다. 이러한 碎波率이 護岸의 堤防을 어느 정도 낮출 수 있을 것인가에 대해서는 本 研究에서 明確하게 正量的인 解析은 困難하다. 그러나, 許容 越波量이 주어지면 그림에서 알 수 있듯이 碎波率의 70%까지는 護岸의 높이를 碎波率과 함께 減少 시킬 수 있다는 定性的인 解析은 可能하다. 70%以上の 碎波率은 越波量 減少에는 아무런 影響이 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 實驗 結果에서 알 수 있듯이 人工reef의 設置水深에 碎波率을 좌우하는 機構가 存在한다는 것을 말한다. 즉, 碎波率이 50%의 以上되는 水深은 人工reef의 設置水深이 $H_{1/3}$ 에 對應하는 規則波의 碎

波點보다 깊은 곳에 人工reef를 設置한 境遇이다. 이는 人工reef의 設置水深이 碎波率에 크게 關係하고 있음을 證明하고 있다. 따라서 人工reef를 設置하여 越波量 低減效果와 周邊環境改善對策으로서 海岸整備을 위한 人工reef의 設置水深은 有義波高에 對應하는 規則波의 碎波點보다 깊은 곳에 reef의 先端이 設置되어야 하며, 이 人工 reef의 形狀은 될 수 있는 한 碎波率을 크게 增加시킬 수 있을 範圍 안에서 人工reef의 높이를 낮게 設置하는 것이 海岸線의 維持管理에 有利하다.

5. 結 論

本 研究에서는 既存護岸 前面에 人工reef를 設置할 경우 越波量 低減效果에 대해 詳細하게 分析하였다. 遂行된 內容을 要約하면 다음과 같다.

1) 碎波率과 越波量의 關係를 調査한 結果, 碎波率이 70%以上이되면 碎波率은 變化가 거의 없다. 碎波率 70%로 하기 위해서는 人工reef의 길이가 ($B/L_{s1}=0.5$)存在하며 아울러 人工reef의 設置水深은 H_{s1} 에 對應한 規則波의 碎波點보다 깊은곳에 人工reef先端을 設置해야한다. 人工reef 높이(h_c)를 높게 하면 碎波率도 增加하고 越波量도 減少하지만, 有限의 높이는 人工reef의 폭B와 設置水深 h 에 關係하고 있다.

2) 深海波浪의 스펙트럼 形狀과 越波量의 關係를 調査한결과 h/H_{s1} 가 0.8以上, h/L_{s1} 가 0.03以上の 堤防의 先端部 設置 水深을 갖는 境遇는 스펙트럼幅(spectral band width)의 파라미터가 크고 스펙트럼 尖銳度파라미터 Q_p 가 작을수록 越波量이 增加하는 것을 알았다. 同時에 人工reef의 높이(h_c)가 높아서 堤防의 先端部 設置 水深이 얇아지면 스펙트럼 形狀에의한 差가 거의 없다.

3) 越波量 低減效果에 有利한 不規則波의 波高와 週期 結合分布는 高波浪과 長週期波를 內包하지 않는 分布形이며 이러한 分布形을 갖기 위해서는 人工reef의 設置水深은 H_{s1} 에 對應한 規則波의 碎波點보다 깊은 곳에 人工reef를 設置해야 한다.

謝 辭

이 論文의 一部는 韓國科學財團 研究費(893-1307-007-1)로 修行 되었다. 韓國科學財團에 感謝를 드린다.

이 연구를 위해 깊은 助言을 해주신 Sawaragi, T. 教授 및 Deguchi, I. 助教授께 깊은 감사를 드리며 동시에 본 논문작성을 도와준 釜山大學校 大學院 碩士過程 崔善皓君에게 感謝를 드린다.

參考文獻

1. Park, S. K., Sawaragi T., Deguchi I.: "Reduction of wave overtopping rate by the use of artificial reefs" Proc. of 21th International Conf. on Coastal Eng., 1988. 6, pp. 335-349.
2. Park, S. K.: "The effects of Reduction Wave Overtopping Rate by the use of Artificial Reefs" Korean society of Civil Eng. 1989. 6, Vol. 9, No. 2 pp. 125-134.
3. 井上雅雄, 柳瀬勝久: "養濱에 よる 越波防止效果" 第32回 日本海岸工學 講演會 論文集, 1895, pp. 470-474.
4. Longuet-Higgins, M. S.: "On the statistical distributions of sea waves", Jour. Marine Res. Vol. 11, No. 3, 1952, pp. 245-265.
5. Longuet-Higgins, M. S.: "The statistical analysis of a random moving surface, Phil. Trans Roy. Soc. London, Ser. A(966) 249, 1957, pp. 321-387.
6. 關本恒活, 水口優: "不規則 波浪變形場의 系統的 解析手法의 提案", 第31回 日本海岸工學講演會 論文集, 1984, pp. 143-147.
7. Battjes, J. A.: "Run-up distributions of waves breaking on slopes," Proc. A. S. C. E. WW-1, 1971, pp. 91-114.
8. 木村晃: "不規則波의 波高 週期의 結合確率 特性 について", 日本土木學會 論文報告集, 第286號 1979, pp. 53-63.
9. 渡邊晃, 川原俊郎: "不規則波의 스펙트럼과 波高 週期 分布의 關係", 第31回 日本 海岸工學講演會 論文集 1984, pp. 153-157.
10. 合田良實, 岸良安治, 神仙豊: "不規則波에 よる 防波護岸의 越波流量에 關する 實驗的 研究" 日本港灣技術研究報告 Vol. 14, No. 4, 1975, pp. 3-44.
11. 河野三夫, 永松一甫: "Reef上의 波의 變形에 關する 現地調査", 제25回 日本 海岸工學 講演會 論文集, 1978, pp. 146-150.
12. Bretschneider, C. L.: "Significant waves and wave spectrum", Ocean Industry, Feb. 1968, pp. 40-46.
13. Mitsuyasu, H.: "On the growth of the spectrum of wind-generated waves(1)", Rept. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. X vi, No. 55, 1968, pp. 459-482.

(接受:1990. 3. 22)