

波浪特性에 따른 越波量算定에 관한 研究

The Estimated Model of Wave Overtopping Volume
according to Wave Characteristic

박 상 길*
Park, Sang Kil

Abstract

In recent years, various types of coastal protection scheme have been studied around the coastal region. Among them, so-called zonal protection systems are being watched with interest from various points of view. In this paper, wave overtopping rate from overflowing the vertical seawall is investigated by conducting two dimensional model on the horizontal bed experiment. Hereafter this system is referred to as a artificial reef system. One is the foundation to control wave height near the surfzone and the other is function to prevent coastal disaster by suppressing net overtopping rate. The main results obtained in this study are summarized as follows. 1) Wave attenuation taken place on the artificial reef can be predicted numerically by using energy dispersion model due to wave breaking proposed by Battjes. 2) To evaluate the wave overtopping rate from a vertical seadike on various coastal constructions by weir model, a numerical procedure for prediction of overtopping is confirmed.

要 旨

해안지대의 土地 利用이 高度化 되면서 護岸背後地에 發生하는 災害에 대한 關心도가 날로 增加하고 있다. 災害은 颶風이 海岸地帶에 來襲하여 護岸을 파괴하고 海水가 陸地에 침입함으로써 發生하고 있다. 이러한 越波에 대한 災害은 過去에는 防災不能의 災害로 認識되어 왔지만 現在는 越波에 대한 研究와 對策이 충분히 講究되어 있는 實情이다. 이들 災害을 防止하고 護岸背後地를 維持管理하기 위해서는 來襲하는 高波浪을 먼 바다에서 強制碎波 시킴으로 인해서 越波가 發生하기 直前に 波高를 低減시키는 것도 面的防禦工法 가운데 하나이다. 本 研究에서는, 來襲하는 波浪의 特性(碎波, 非碎波 그리고 不規則波, 規則波)을 考慮하여 不規則波의 人工Reef상에서 波高 週期結合分布의 適用性을 檢定하고, 越波量을 算定함으로써, 보다 精度 높은 越波量을 算定 할 수 있는데 特性이있다. 한편, 不規則波의 越波量 實驗을 통하여 既存式들과 比較하여 本 Model의 適用性을 밝히고, 規則波와 不規則波의 越波量의 差를 밝혀서 直接 設計의 基礎資料로 利用 하도록 하였다.

*正會員 · 釜山大學校 工科學科 土木工學科 助教授

1. 序 論

親水性 海岸이란 人間이 恒常 물과 安全하게 즐길 수 있도록 人爲的으로 築造된 海岸 構造物의 一種으로서 防災機能 및 環境保全 機能을 함께 갖춘 人工 護岸을 말한다. 親水性 護岸의 設置를 必要로 하는 海岸은 周邊景觀이 卓越하여 國民 健康을 위한 休息空間을 提供 할 수 있는 同時에 自然에 의한 防災의 機能이 喪失되어 人爲的으로 防災 構造物을 築造 해야할 곳이다. 從來의 海岸 防災工法은 防災機能 만을 重視한 나머지 지나치게 높은 護岸이나 離岸堤를 설치 함으로써 海岸이 갖는 본래의 自然 景觀과 眺望을 沮害하는 缺點이 있다.

最近에는 이러한 점들을 補完하고 바다가 갖는 景觀과 利用面은 물론 環境保全 側面을 同時에 考慮한 海岸 防災對策의 樹立이 要請되고 있다. 이러한 防災對策의 根本的인 治癒方法中 그 하나는 海岸으로 來襲하여 오는 高波浪을 먼 바다에서 어느 程度 낮게 減衰시키는 가에 달려 있다. 外國의 海濱中에서 Hawaii, Okinawa의 海濱은 珊瑚礁가 먼 바다에서 폭넓게 散在되어 있어 이로 인해서 高波浪이 珊瑚礁에 의해서 強制 碎波된 底波浪이 海岸에 到達하여 언제나 깨끗한 海岸線을 維持保全할 수 있고, 同時에 越波와 浸蝕으로 인한 被害가 없는 安樂한 休息空間이 提供되는 國際的인 休養海濱이다.

現在의 海岸海洋 港灣構造物의 設計에는 大部分의 경우 設計波를 單一波高, 單一週期, 單一波向의 波로 假定하고 있다. 模型實驗에서도 波高 週기가 同一한 規則波를 使用하여 實驗을 하고 있다. 理論上으로도, 波高가 큰 경우에는 有限振幅性의 效果를 考慮하여 計算을 하고 있어도 波의 不規則性을 考慮할 경우는 매우 적다. 實際 바다에서 發生하는 波浪은 週期, 波高, 波向 등의 諸元이 各各 다른 成分들이 모여서 海岸으로 連續的으로 밀려오고 있다. 이것이 不規則波의 特性이다. 이들 不規則波中의 有義波 등의 代表값은 不規則波의 크기를 階級別로 分類하여 表示한 것이다. 단지, 波高 週기를 直觀的으로 알아보기 쉬운 形式으로서 表現 한 것이며, 波高와 週기가 一定한 規則波에 對應시켜서, 不規則波로 使用하고 있다. 特히 越波는 不規則性이 강한 淺海地域에서 碎波를 同伴하여 發生하고 護岸前

面의 條件에 대해서 越波量이 決定되므로 越波 直前의 波浪特性을 밝힐 必要性이 있다. 이러한 縱傾斜 人工 Reef護岸을 設置한 경우에 있어서 縱傾斜 人工 Reef上의 波浪豫測 Model을 適用하여, 越波量의 既存資料를 整理하고 構造物 形態에 따른 越波特性和 越波量의 差異를 實驗을 통하여 밝혔다. 한편, 規則波와 不規則波의 越波量 特性을 正量化 하였다.

2 人工 Reef上的 不規則 波浪 豫測 Model의 確立

2.1 不規則波의 波高變化 Model

人工 Reef에 對한 規則波의 波高變化에 대해서는 朴^{1), 2)} 등에 의해서 豫測方法과 Model의 妥當性을 確認했다. 不規則波의 波浪變形計算 方法中 하나는 不規則波를 zero-up-crossing法으로 各波를 定義하고, 이것을 同一한 波高를 갖는 規則波로 對應시켜서 規則波의 理論을 適用하여 解析하는 것이 波別解析法(individual wave analysis Method)이다. 이것을 利用하여 深海地域(現場觀測)에서 얻어진 波의 時系列로부터, 各波에 대한 淺水變形 計算을 한다. 먼저 不規則波의 各各의 波에 對한 波高變化를 定式化 하기 위해서 碎波前의 波高變化는 특히, 碎波直前に 있어서 非線形性이 강하기 때문에 有限振幅波에 의한 計算이 必要하다. Shuto의 非線形 長波理論³⁾에 의한 다음式을 使用한다.

$$gHT^2/h^2 < 30 : k_0 = \left[\left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right) \tanh(2\pi h/L) \right]^{-1/2}$$

$$30 < gHT^2/h^2 < 50 : Hh^{27} = \text{const} \quad (1)$$

$$50 < gHT^2/h^2 : Hh^{32} / (\sqrt{gHT^2/h^2} - 2\sqrt{3}) = \text{const}$$

여기서, g 는 重力加速度, T 는 週期, H 는 波高, h 는 水深이며, $Ur(gHT^2/h^2)$ 는 Ursell No. 이다. 碎波波高 H_b 의 計算은 合田⁴⁾의 算定式을 使用한다.

$$H_b/L_0 = A[1 - \exp(-1.5\pi h_b/L_0(1 + 15\tan^4\theta))] \quad (2)$$

여기서, h_b 는 碎波水深, L_0 는 深海波長, θ 는 海濱傾斜이다. 自然海濱(一定傾斜海岸)에서는 A 값의 分布가 0.14-0.18사이에 分布한다. 人工Reef에 의해서 強制碎波할 경우의 A 의 값은 朴³⁾ 등이 提案한 式을 使用한다.

$$A = (2.18h/L_0 + 0.45)hs/h + 0.17 + 0.21h/L_0 \quad (3)$$

여기서, $0.25 < h_b/h < 0.75$, $0.03 < h/L_0 < 0.1$ 이다. h 는 人工Reef設置水深, hs 는 人工Reef의 높이, L_0 는 深海波長이다. 碎波後의 波高變化는 energy平衡式을 使

用하여, Bore 상태의 波로 看做하여 Battjes의 Model⁵⁾을 사용한다.

이 model의 長點은 波形傾斜 및 海低傾斜의 係數인 Surf-similarity parameter가 內包되어 있어서 波浪變化의 外的條件이 갖추어진 Model이다. 그림 1은 Bore Model의 概念圖이다.

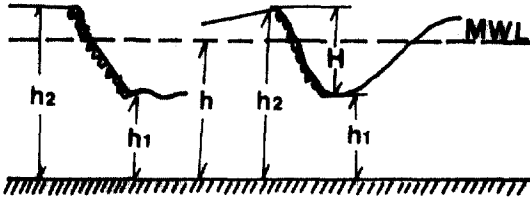


그림 1. The sketch of bore model(Battjes, 1978)

에너지 平衡式은 다음과 같다.

$$dP/dx + D = 0 \quad (4)$$

여기서 P는 energy flux이며 x는 距離의 間隔,

D는 에너지 逸散率(energy dispersion)rate이다.

$$P = EC_g = 1/8 \rho g H^2 \sqrt{gh} \quad (5)$$

$$D = \frac{B}{4\gamma^3} \frac{\rho g H^2}{T} \left[\frac{H}{h} \right]' \quad (6)$$

여기서 E는 波浪이 갖는 total Energy, ρ 는 密度, C_g 는 波의 群速度. B와 γ 는 係數이며 다음式으로 주어진다.

$$\gamma = 0.75 + 5 \tan \theta \quad 0.01 < \tan \theta < 0.1 \quad (7)$$

海底傾斜가 1/20보다 급한 경우

$$B = 1 \quad (0.9 < h/h_b \leq 1.0) \quad (8)$$

$$B = 13 - 40/3(h/h_b) \quad (0.6 < h/h_b \leq 0.9)$$

$$B = 5 \quad (h/h_b \leq 0.6)$$

海底傾斜가 1/20이거나 이보다 緩慢할 경우

$$B = 11 - 10h/h_b \quad (0.6 < h/h_b \leq 1.0)$$

$$B = 5 \quad (h/h_b \leq 0.6) \quad (9)$$

平均 水位上昇量(wave set-up)은 運動量 平衡式을 使用하고 沿岸方向으로 波의 變化가 없다고 하면 다음式으로 表現된다.

$$dF/dx = \bar{P}_b dh/dx \quad (10)$$

여기서 \bar{P}_b 는 海底에서의 平均壓力이다.

Longuet-Higgins와 Stewart⁶⁾는 海底傾斜가 急傾斜를 除外하고는 \bar{P}_b 의 값을 다음式으로 表現하였다.

$$\bar{P}_b = \rho g (h + \bar{\eta})^2 \quad (11)$$

Radiation stress S_{xx} 는 다음과 같다.

$$S_{xx} = F - 1/2 \rho g (h + \bar{\eta})^2 \quad (12)$$

여기서 F는 運動量flux, h는 수심, $\bar{\eta}$ 는 平均水位上昇量(wave set-up), ρ 는 물의 密度, g는 重力加速도이다.

式(10)은 式(11)을 利用하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dF/dx = \rho g (h + \bar{\eta}) dh/dx \quad (13)$$

微小 振幅波 理論에 의하면 S_{xx} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{xx} = E(2C_g/C - 1/2) \quad (14)$$

천해지역에서 $C = C_g = \sqrt{gh}$ 이므로

$$S_{xx} = 3/16 \rho g H^2 \quad (15)$$

이같이 微小振幅波 理論에 의해서 求한 平均水位上昇量 값은 實測值 보다도 過大評價되는 傾向이 있다는 것을 Sawaragi⁷⁾, Stive⁸⁾에 의해서 指摘되고 있으며 本 研究에서도 이들이 指摘한 事項을 重視한 結果, 式(15)를 0.6배한 값을 radiation stress로서 使用하여 計算結果를 比較分析한다. 波浪變形의 計算方法으로서의 解의 接續性이 좋은 差分計算法을 使用하여 다음과 같이 差分化 시켰다.

$$P_i - P_{i-1}/\Delta x = -D_{i-1} \quad (16)$$

$$S_{xx} - S_{xx-1}/\Delta x = -\rho g (h_{i-1} + \bar{\eta}_{i-1}) \bar{\eta}_i - \bar{\eta}_{i-1}/\Delta x \quad (17)$$

2.2 不規則波의 波浪變形에 대한 豫測모델의 檢證

人工Reef上의 不規則波의 波浪計算變形은 規則波의 波浪變形豫測方法을 使用해서, 深海地域에서 얻어진 波의 時系列을 가지고 各波에 대해서 淺水變形을 한다. 各各의 波를 淺水變形을 시킨후, 碎波된 波에 대한 波高, 週期の 結合分布를 人工Reef上의 任意水深에서 求하여 Reef先端에서 強制碎波한 波에 대하여 波別解析의 妥當性을 檢證한다. 이것들은 不規則波의 越波量 算定 및 人工Reef를 構成하는 養濱砂의 制御機構를 檢證하는 前段階로서, 解決되어야 하는 重要な 課題이다.

實驗에 使用한 裝置은 그림2와 같다. P는 波高計를 設置하여 水位變動의 時系列을 測定한점, h는

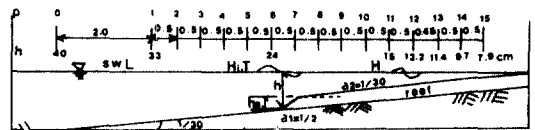


그림 2. Experimental equipment.

표 1. Experimental Case

case	$H_{1/3}$ (cm)	\bar{H} (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	T (sec)	h_b (cm)	h_b/h	人工Reef길이 (cm)	碎波点($H_{1/3}$)
1-1	10.10	6.51	1.22	1.02	0	0	0	規則波
1-2	10.15	6.50	1.22	1.02	0	0	0	不規則波, 自然海濱
1-3	10.05	6.49	1.22	1.02	0	0	0	不規則波, 自然海濱
2-1	9.72	6.20	1.21	1.01	4.5	0.34	45	淺海
2-2	9.37	5.91	1.21	1.00	4.5	0.30	100	碎波点
2-3	9.20	5.90	1.22	1.03	4.5	0.27	150	深海
2-4	9.13	5.78	1.24	1.04	4.5	0.24	200	深海
2-5	9.70	5.54	1.24	1.01	7.0	0.53	45	淺海
2-6	9.70	5.48	1.22	1.00	7.0	0.47	100	碎波点
2-7	7.60	4.20	1.22	1.00	7.0	0.42	150	深海
2-8	7.60	4.18	1.22	1.00	7.0	0.38	200	深海

波高計 設置地點의 水深이다. 不規則波의 實驗을 하기 전에 먼저 不規則波의 $H_{1/3}$ 에 相應하는 規則波를 發生시켜서 碎波点을 決定하고, 碎波点을 基点으로 하여 Reef의 幅을 碎波点內, 碎波点, 碎波点보다 深海로 區分해서 不規則波의 實驗을 했다. 그림 2의 P_{11} 은 水深 15cm이며 規則波의 碎波点에 相應한다. 不規則波의 實驗에 사용한 諸元은 다음과 같다.

人工Reef의 波浪變形에 대한 波別解析의 妥當性을 考察하기 以前에 먼저 自然海濱에 대한 波浪의 波別解析의 妥當性에 대해서 檢討을 한다.

表1의 1-1, 2, 3의 自然海濱에 대한 實驗이며, 自然海濱에서의 波別解析의 妥當性에 대해서는 Mase⁹⁾에 의해서 實驗값과 計算값이 잘 一致 한다고 報告 되어있다. 여기서 波別解析의 妥當性에 대한 判斷條件 으로서는, 實驗의 深海地點(P_1)에서 얻어진 時系列의 波高, 週期의 分布形이 同一水深의 計算에서 얻어진 分布形과 實驗에서 얻어진 分布形이 一致하고 있는 가를 調查하는 것이다.

그림3은 水深이 40cm인 곳의 不規則波의 Spectrum形을 表示한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 週期가 5秒를 前後로 若干의 에너지가 集中되고 있는 것은 水槽內에서 發生한 것으로 確實한 原因은 糾明되지 않았지만 水槽內의 長週期 現象으로 인한 振動에서 發生한 것으로 看做된다. 그림4는 自然海濱에서의 波高, 週期 結合分布이며, (a)는 計算값을 (b)는 實驗값을 나타낸다. 그림4에는 表示되어 있

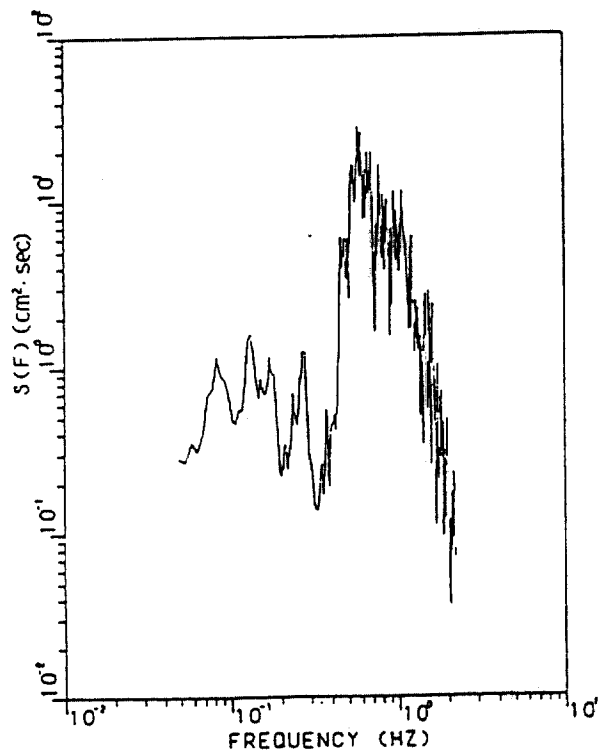
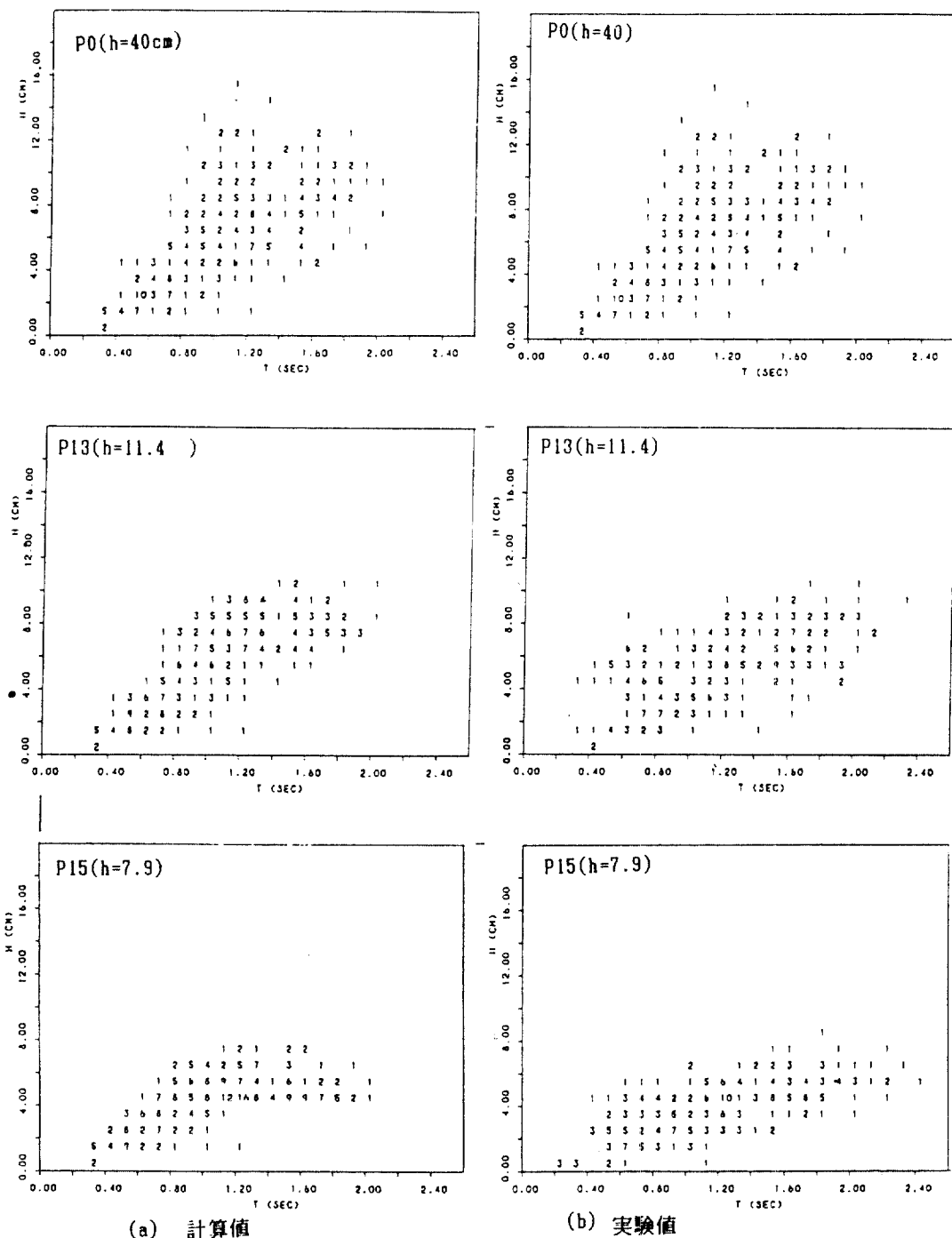


그림 3. Shape of random wave spectrum.

지않지만 P_{12} 는 P_{11} 보다 水深이 多少 깊은 곳으로 部分的으로 碎波가 일어나고 있으며 P_{13} 에서는 完全碎波現象이 나타나고 있다. 그림에서, 計算값보다도 實驗값에 큰 波의 成分이 存在하며, 水深이 알



(a) 計算値

(b) 実験値

그림 4. Joint distribution of H and T for 1/30beach uniform slope

아짐으로 인해서 計算값보다 實驗값에서 長週期波가 많이 發生하고 있는 것을 알 수 있다.

23 人工Reef上的 波浪變形에 대한 派別解析의 妥當性

人工Reef上的 波浪變形에 대한 波別解析의 妥當性은 堤防前面에 設置한 Reef의 길이와 높이를 變化시킨 實驗結果와 計算結果를 比較 檢討하여 確認

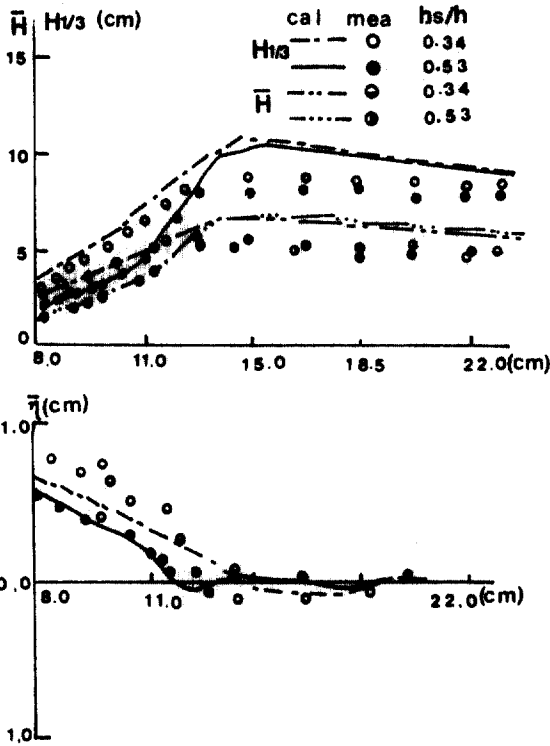


그림 5. Change of significant and mean wave heights(wave set-up, down)in random wave for artificial reef.

한다. 그림5는 人工Reef의 길이를 일정하게 해두고 높이를 변화시켰을 때 有義波高 $H_{1/3}$ 과 平均波高 H 의 分布 및 平均水位 上昇량을 計算과 실험에서 求하여 나타낸 것이다. 實線 및 一點 鎖線은 h_s/h 가 0.53과 0.34인 $H_{1/3}$ 의 計算結果이고, 點鎖線과 點鎖線은 實驗結果이다. 人工Reef를 設置한 水深보다 깊은쪽은 計算값과 實驗값이 잘 一致하고 있다. 平均波高 H 에 대해서도 $H_{1/3}$ 과 같은 結果를 가져오고 있다. 平均水位 變動量의 分布에 대해서는 計算값보다 實驗값이 약간 큰 傾向을 보이고 있다. 이는 計算式中에서 radiation stress를 算定 할때 波高의 正確한 計算이 必要로 한다는 것을 意味하고 있다.

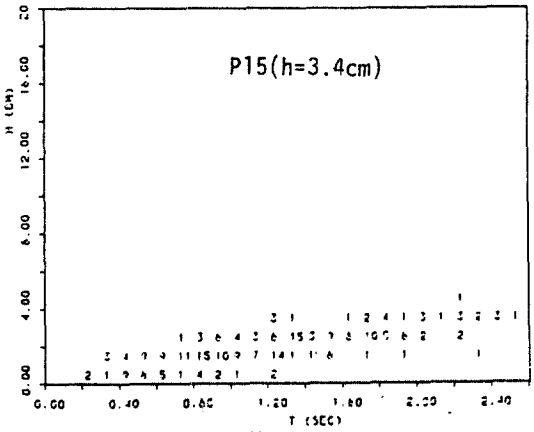
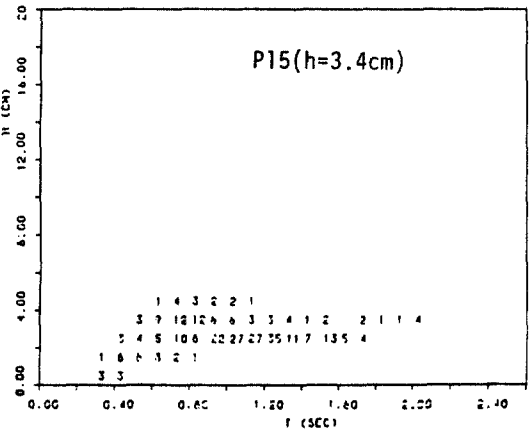
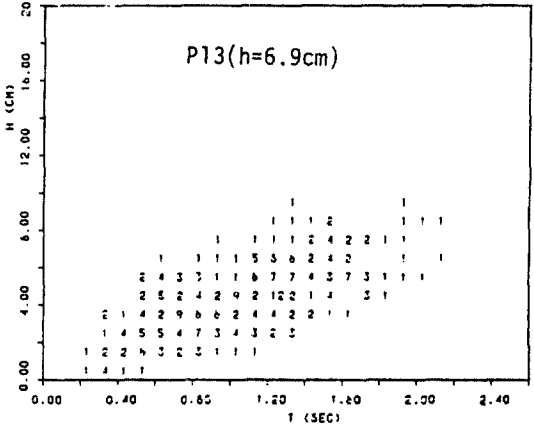
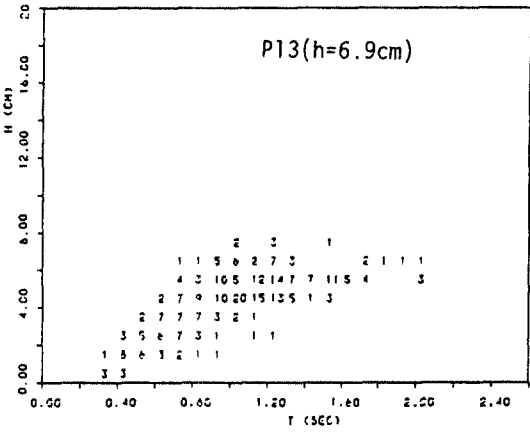
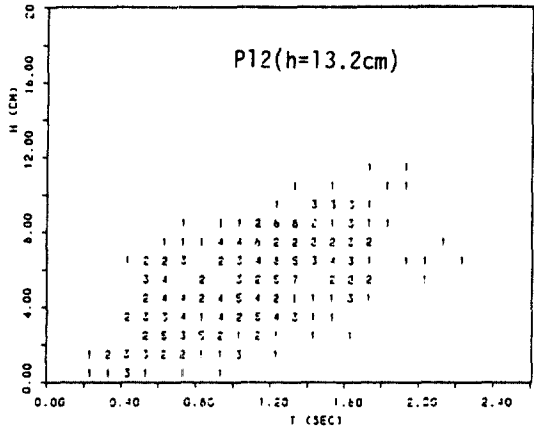
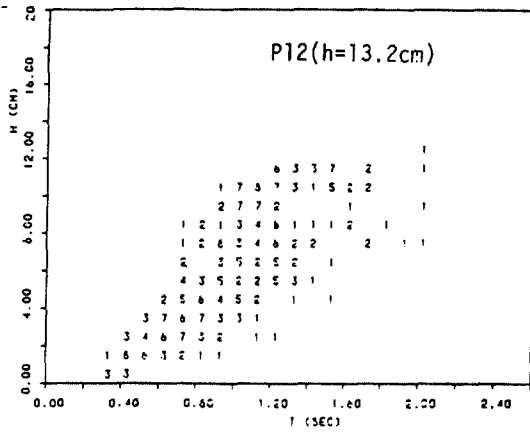
그림6은 人工Reef의 길이가 짧은 경우(碎波点內設置)의 波高, 週期의 結合分布를 나타낸 것이다. 全 領域에 걸쳐서 計算結果는 實驗結果보다 큰 波浪이 存在한다는 것을 알 수가 있다. 例로서 P_2 地點에서 計算結果는 10cm以上の 波高가 약 55개 程度 存在하지만, 實驗에서는 6개만 存在한다. P_3 地點

에서는 4cm以上の 波高가 13개 存在하지만 實驗에서는 週期가 2초이상인 波가 1개 存在한다. 이러한 差異를 發生시키는 것은, 實驗에서는 淺水變形의 波高減少 原因이 作用 하여, 直接的으로 波를 減衰시키지만, 計算에는 이런 項目들을 全部 考慮하여 計算을 하지 않았기 때문이라고 判斷된다.

그림7은 人工Reef의 길이를 길게하여(碎波点보다 深海에 設置)H-T의 結合分布를 調査한 것으로 P_2 는 Reef의 先端部에 대한 H-T의 結合分布, P_3 은 Reef先端에서 195cm 떨어진 深海地域에 대한 H-T의 結合分布 P_5 는 Reef先端에 295cm 떨어진 深海地域에 대한 H-T의 結合分布이다. 이 그림에서 P_2 가 計算에서는 8cm 以上の 波가 37개 存在하지만, 實驗에서는 10개 밖에 존재하지 않는다. P_3 의 計算에서는 6cm 以上の 波가 23개 存在 하지만 實驗에서는 2개 밖에 存在하지 않고, P_5 의 計算에서는 3cm 以上の 波가 38개 存在하지만 實驗에서는 24개 밖에 存在하지 않는다.

以上에서 全領域에 걸쳐서 計算에서 求한 H-T의 結合分布는 實驗에서 求한 結合分布 보다 큰 波高를 包含하고 있다. 이는 그림6에서 說明한 理由와 同一하다. 그림7과 그림6을 比較하면, H-T의 結合分布에 대해서 Reef의 길이가 짧은 것 보다도 긴 것이 實驗값과 計算값이 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 人工Reef의 길이가 H-T의 結合分布에 미치는 影響에 대해서 檢討 하기로 한다.

그림6은 Reef 先端部の 水深이 132cm, 그림7은 Reef先端部の 水深이 185cm이다. 이때 그림7이 그림6보다 Reef의 길이가 4배 정도 길다. 그림6과 그림7의 P_3 地點인 實驗값에서 6cm以上の 波高를 갖는 波는 各各 110개와 30개이다. 이는 그림6의 길이보다 그림7의 길이가 두배 程度 길다. 따라서, Reef의 길이가 길면 波高 減衰에 대하여 效果가 큰 것으로 나타난다. 그러나 그림6, 그림7의 P_5 地點에서 波高를 比較하여 보면 各各 26개와 25개로서 거의 差가 없음을 알 수 있다. 이같은 結果는 人工Reef의 길이가 波高를 減衰시키는 效果를 가지고 있지만, 길이에 따라서 減衰機能이 比例하는 것은 아니다. 따라서 波高浪을 減衰시킬 目的으로 人工Reef를 길게 設置해도 減衰效果를 全部 볼 수 없고 어느 程度 以上은 減衰機能에 效果가 없음을 確認 할 수 있다. 이는 高波浪을 減衰시키는 有限의 人工Reef



(a) 計算値

(b) 実験値

그림 6. Joint distribution of H and T for 1/30 beach slope of artificial reef. (length of reef B=45cm)

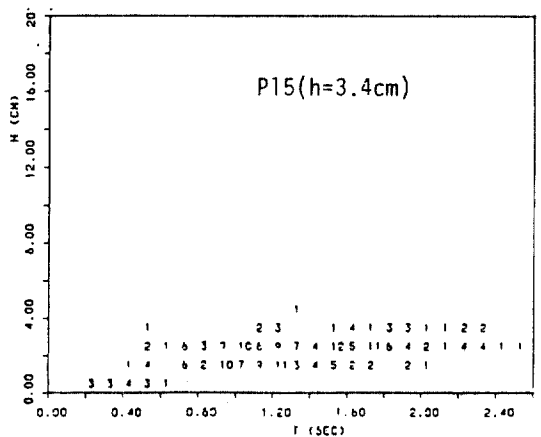
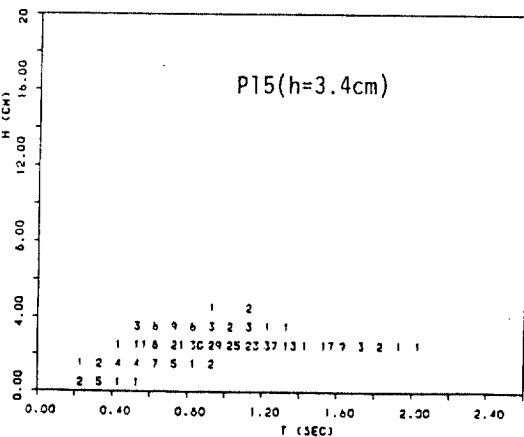
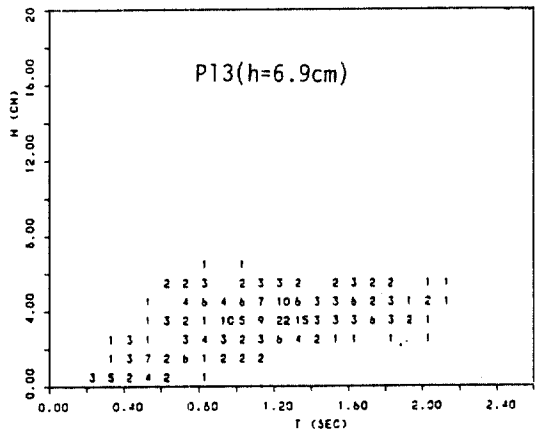
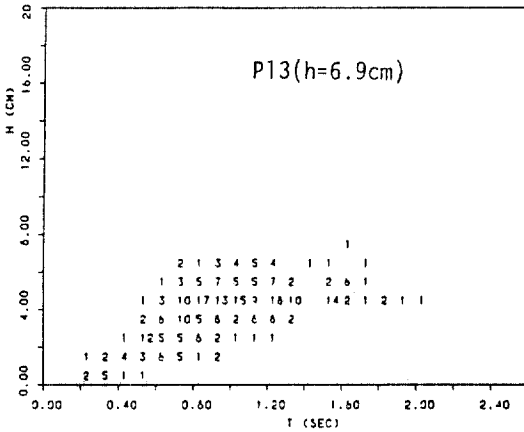
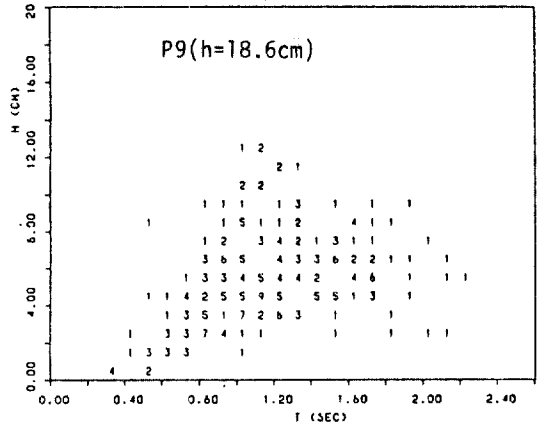
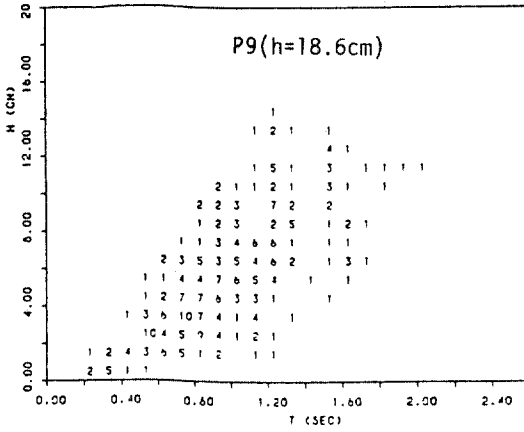
의 有効깊이가 存在함을 알 수 있다.

以上에서 自然海濱에 人工Reef를 設置하여 入射波를 Reef先端에서 強制碎波 시킬 경우 波高豫測方法中 하나인 波別解析法이 H-T의 結合分布를

어느 정도 表現可能 하다는 것을 確認했다.

2.4 豫測 Model의 妥當성과 問題點

不規則波의 波浪變形 豫測方法은 規則波의 波浪變形豫測 方法과 같이, 入力波高로써 水深 40cm의



(a) 計算値

(b) 實驗値

그림 7. Joint distribution of H and T for 1/30 beach slope of artificial reef. (length of reef B=200cm)

時系列을 使用하여, 碎波限界式(2) 中에서 A의 값은 (3)式을 利用 하였다. 이들 計算結果와 實驗結果를 比較하여 要約하면 다음과 같다. h_0/h 가 크게 되면, 先端部 보다 深海地域의 $H_{1/3}$ 波高는 實驗보

다 計算값이 10%정도 크게 算定되지만, 人工Reef上에서는 實驗 및 計算 모두 잘 一致함을 알 수 있다. 平均波高 H는 全領域에 걸쳐서 計算값은 實驗값보다 10%정도 크게 算定된다. 人工Reef의 設置

水深이 깊을 수록 $H_{1/3}$ 의 計算값은 設置水深이 얇을 때보다 計算값과 實驗값이 잘 一致한다. 平均水位 上昇量은 h_s/h 와 Reef의 先端位置에 關係없이 計算값과 實驗값이 잘 一致한다. 이것으로 부터 (15)식의 妥當性이 충분히 된다고 할 수 있다. 본 Model의 問題點은 다음과 같다.

H-T의 結合分布에 있어서 計算結果가 實驗보다 波高가 큰 波浪을 內包하고 있다. 理由로서는 (6)식의 에너지 逸散率(energy dispersion rate)D를 적게 評價하는 것이 바람직하다. 다음으로, 實驗에서 求한 H-T의 結合分布는 長週期波가 發生하는 淺海에서 差異가 많이 나타나고 있다. 卽, 實驗에서 처음의 週期和 다른 週期를 갖는 波數가 變化하고 있다. 本 研究에서는 이것에 대해서 충분한 分析이 되지 못했다.

3. 越波量 算定 Model化

3.1 越波量의 新無次元 表示

從來에는 水深의 波浪諸元을 使用해서 表現하고 있는 越波量에 관한 無次元 表示를 使用하여 왔다. 여기서는 越波가 護岸前面에서 發生한다는 點에 着眼하여 護岸前面의 波浪 諸元을 使用해서 表現하기로 한다. 이때 單位時間에 發生하는 越波量 Q에 관한 諸元은 다음식과 같다.

$$Q = f(H_s, h_s, H_c, \theta, \rho, \mu, g, \alpha) \quad (18)$$

여기서 θ 는 護岸前面의 海底傾斜, ρ 와 μ 는 물의 密度와 粘性係數, g 는 重力加速度, α 는 護岸傾斜, H_s 와 h_s 는 各各 護岸前面의 波高와 水深, T 는 周期, H_c 는 平均水位를 考慮한 護岸높이 이다. 無次元 越波量 q 는 다음식으로 表示된다.

$$q = Q / \sqrt{g L_c H_s^2} = f(H_s/H_c, h_s/h_s, \theta, \alpha, g H_s^2 / u T^2) \quad (19)$$

越波에 대해서는 粘性의 效果를 작다고 본다. $g H_s^2 / u T^2$ 는 無視되며 實驗에서 $\alpha = 90^\circ$ 로 일정하고, H_s/h_s 는 H_s/L_c 와 θ 의 函數이며 獨立變數는 아니다. 自然海濱에서 式(19)와 같은 無次元越波量 q 를 再定理 하기 위해서는 앞에서 Model化 시킨 波浪變形을 使用한다. 再定理에서 使用한 波浪條件은 $H_s/L_c = 0.01 - 0.0803$, $h_s/L_c = 0.14 - 0.20$, $H_s/H_c = 0.2 - 2.80$ 이다. 그림8은 自然海濱에 대한 越波量을 式(19)로서 無次元化한 것이다.

碎波點을 基準으로 해서 碎波가 發生하지 않고서 越波하는 越波量의 表示를 검은 원으로 表示 했으

며, 碎波가 發生했을때의 越波量을 흰원으로 表示 했다.

이 그림에서 確實히 나타난 바와 같이, 波形傾斜와는 關係없이, 碎波가 發生하지 않고 越波하는 重複波 領域의 無次元 越波量과, 碎波領域에서의 無次元 越波量으로 區分이 可能하다. 한편 同一의 H_s/H_c 에 대해서 重複波 領域의 無次元 越波量(q_c)이 碎波 領域의 無次元 越波量(q_b)보다 적은 값을 갖는다. q_b 는 同一의 H_s/H_c 와 H_s/h_s 에 대하여 分布가 달라지며, q_c 는 同一의 H_s/H_c 에 대해서는 H_s/h_s 에 는 影響을 받지 않고 一定한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

그림9는 그림8(a)-(d)에 表示된 碎波領域의 分散 分布되어 있는 原因을 考察하기 위하여, H_s/L_c 의 값이 0.03-0.04일때, q_b 를 X_s/L_c 에 의한 變化를 나타내고 있다. 여기서 X_s 는 碎波點에서 護岸設置地點까지의 距離이며 L_c 는 碎波水深에 대한 波長이다. 自然海濱의 碎波領域 q_b 는 X_s/L_c 가 어느程度 增加하면 어느程度 增加 하지만 X_s/L_c 가 0.5-0.8을 超過하면 無次元 越波量 q_b 는 碎波後의 減衰 碎波形式 護岸에 의한 反射波와 干涉等에 크게 依存되어 있는 것을 알 수 있다.

3.2 重複波 領域과 碎波形式에 對한 越波 Model

自然海濱에서 無次元 越波量 q 는 q_c 와 q_b 로 分離하여 算出해야 한다는 것을 알았다. 人工Reef를 設置함은 波를 深海에서 強制碎波 시키며 人工Reef上에서는 다시 깨끗한 正弦波로 되는 것을 알 수 있다. 여기서는 人工Reef를 충분히 길게해서 吉川¹⁰⁾ 등의 越波量 算定식을 人工Reef上까지 擴張 하기로 한다. 單位時間, 單位幅當의 越波量 算定식은 다음과 같다.

$$q = \frac{Q}{H_s \sqrt{2g H_s}} = \frac{4}{3} m k^{3/2} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (F(t) - \frac{H_c}{k H_s})^{2/3} dt \quad (20)$$

여기서, m 은 越流係數, $k = \eta_{max}/H_s$, η_{max} 는 越波때의 護岸前面의 最大水位 上昇量, $F(t)$ 는 越波時의 時間變化, 卽 $\eta = \eta_{max} \cdot F(t)$ 이다. 越波가 發生하지 않을 경우는 (完全反射) $\eta_{max} = H_s$ 이며 t_1, t_2 는 각각 $\eta = \eta_{max}$, $\eta = H_c$ 로 되는 時刻를 表示한다. 式(19)와 式(20)은 無次元 方法이 다르다. 여기서는 護岸前面의 波浪特性을 利用하여 越波量을 算定하고, 波形傾斜效果를 explicit로 表現하기 위하여 式(19)와 같

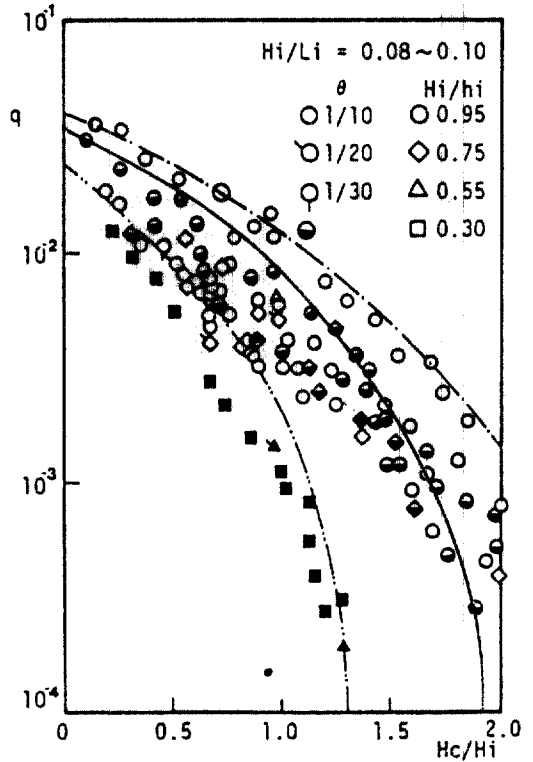
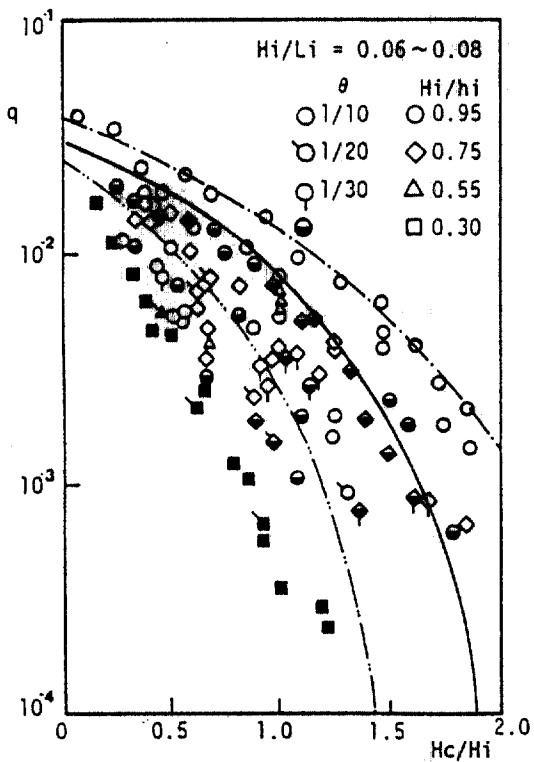
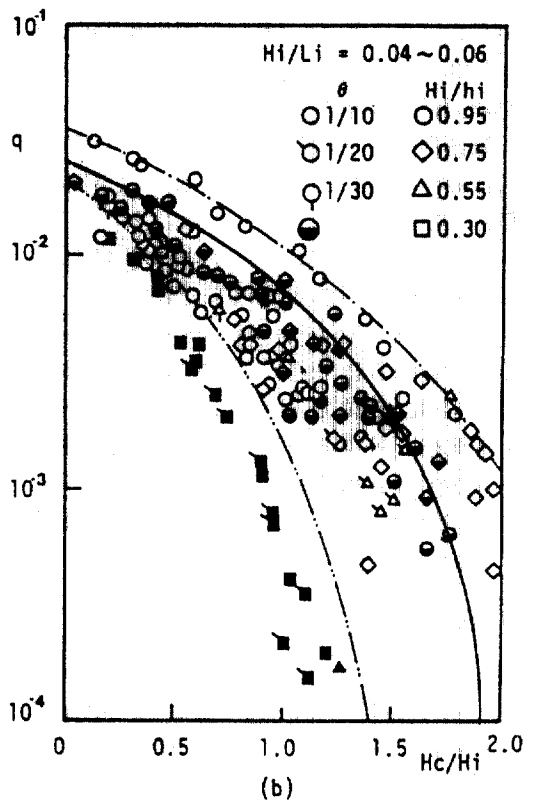
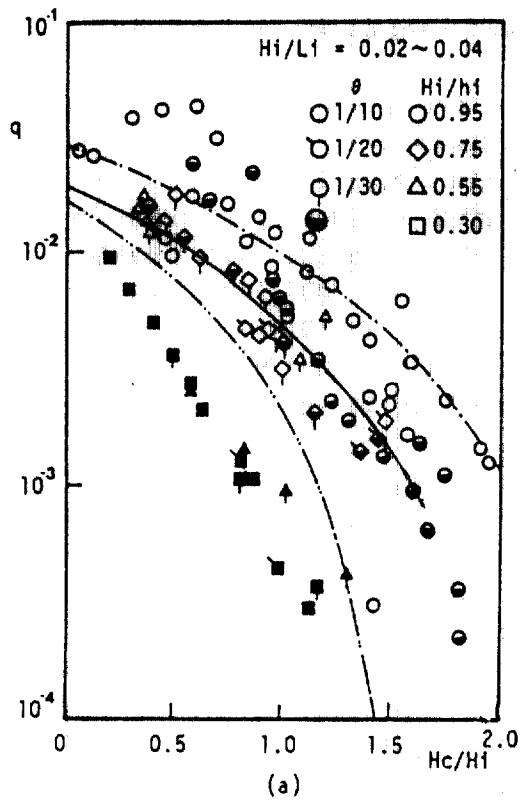


그림 8. Nondimensional overtopping rate of vertical seawall by regular waves for natural beach.

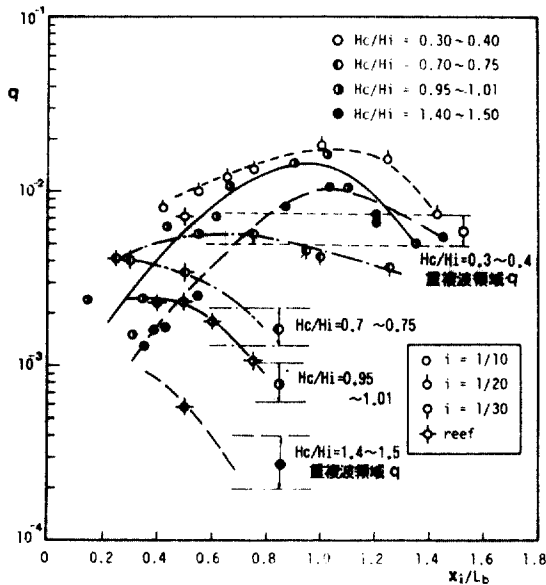


그림 9. Change of nondimensional overtopping rate of vertical seawall regular wave breaker zone.

은 무次元 越波量 表示를 한다. 式(20)을 式(21)로 고쳐 쓴다.

$$q = \frac{Q}{H_i \sqrt{2gH_i}} = \frac{4\sqrt{2}}{3} mk^{3/2} \frac{H_i}{L_i} \int_{t/T}^{t_0/T} \left\{ F(t/T) \frac{H_c}{kH_i} \right\}^{3/2} \cdot d(t/T) \quad (21)$$

無次元量 q 는 H_i/L_i , H_c/H_i , $k = \eta_{max}/H_i$ 와 $F(t)$ 의 4가지量으로서 정해진다.

3.3 人工Reef上的 規則波의 越波量 算定

重複波 領域과 碎波領域에 대한 q_c 와 q_b 에 대해서는 朴, Sawaragi¹³⁾等에 의해서 妥當性을 檢定했다. 여기서는 波浪이 人工Reef 先端에서 強制碎波한 波의 越波量 特性을 Model化 하기로 한다.

式(21)을 使用하여, 人工Reef上的 越波量 q ,를 算定 하기전에 人工Reef上的 波浪特性에 關係하여 정해지는 K_r 를 算定해야 한다. K_r 에 必要한 越波量은 水理實驗을 통하여 測定했다. 人工Reef의 諸元이 K_r 에 影響을 주는 要素는 H_c/H_i , H_i/h_i , X_i/L_b , 3개이다. X_i/L_b 는 K_r 과 $F(t)$ 에 影響을 미치는 要素로서 碎波領域의 越波量에만 影響을 준다. 人工Reef 先端에서 強制碎波한 波浪은 Reef上을 통과함에 따

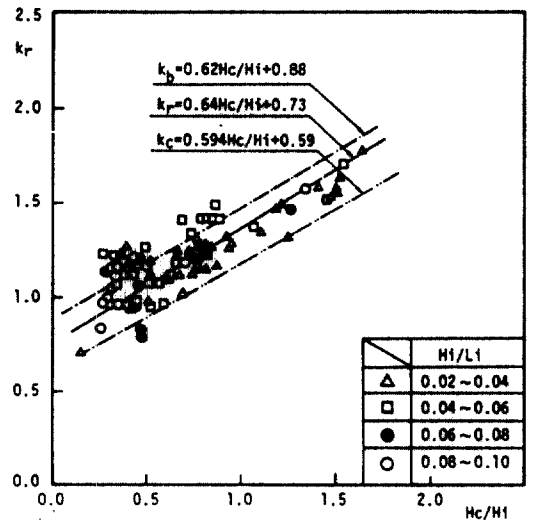


그림 10. Variations of k with increase in wave height (H_i/H_c)

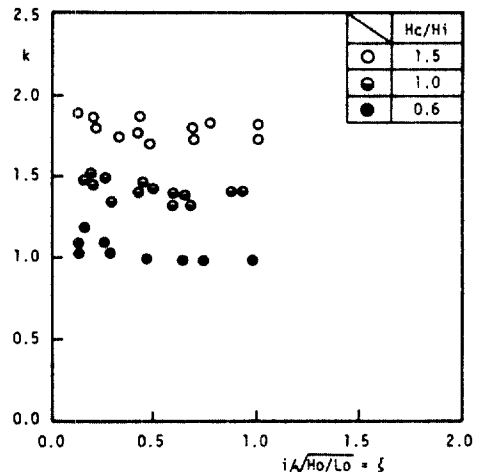


그림 11. Variations of k with surf similarity parameter.

라서 에너지를 發散 시켜 가면서, 碎波後에는 波高가 적은 正弦波로 再生되는 것을 알았다. 이것을 再生波(stable wave)라고 칭한다. 따라서 人工Reef의 길이가 波浪減衰에 必要한 충분한 길이를 취하면 越波量도 적어지는 것을 알 수 있다.

그림 10은 縱軸에 K_r , 橫軸에 H_c/H_i 를 취하여 H_c/H_i 의 變化에 따른 K_r 의 變化를 나타낸 것이다. K_r 는 H_c/H_i 의 增加函數이고, 前面波形傾斜의 影響은

보이지 않는다. 그림 11은 이 前面波形傾斜가 K_0 에 미치는 效果를 確實하기 위해서 縱軸에 K_0 , 橫軸에 surf-similarity parameter ξ 를 취하였다. (이 경우 θ 는一定하며 H_0/L_0 는 變化) $\xi < 0.4$ 의 範圍에서는 K_0 가 若干 작아지는 傾向을 보이지만 $\xi > 0.5$ 에서는 ξ 는一定값을 가지며 H_0/H_1 에 따라서 變化하는 것을 알 수 있다.

一般的으로 ξ 가 0.4보다 작은 境遇는 波高의 碎波形式이 崩壞波(Spilling breaker) $0.4 < \xi < 2.0$ 는 卷波(plunging breaker)의 形式으로 碎波하고 있음을 알 수 있다. 이같은 波의 碎波形式이 K_0 에 關係가 있지 않을까? 생각된다. 따라서 그림 10의 實驗값에서 K_0 를 最小自乘法으로 表示하면 다음式과 같다.

$$K_0 = 0.64(H_0/H_1) + 0.73 \quad (22)$$

3.4 越波量 算定式의 檢證

式(21)의 越波量 推定値의 檢證을 K_0 를 使用해서 算定하기로 한다. 물론 K_0 , K_1 를 사용하여 重複波 領域과 碎波領域의 越波量도 算定이 可能하다. 이들 算定式도 K 代身에 K_0 , K_1 를 使用 함으로써 式(21)에서 求할 수 있으며, 一点鎖線, 二点鎖線은 이들의 計算값을 나타낸다. 全領域에 대하여 計算값이 實驗값보다 약간 크게 算定되고 있는 것을 알 수 있다. 특히 $H_0/H_1 = 0.5 - 1.0$ 사이에는 計算값이 實驗값보다 크게 評價 되고있다. 이 原因은 越波時의 時間波形 $F(t)$ 를 正弦波로 假定한 理由이다. 즉 實際 越波時의 波形의 面積이 正弦波로 假定한 面積보다 적기 때문이다.

그림 8 (a)의 碎波領域에서 H_0/h_0 가 0.95以上的의 實驗값은 計算값보다 매우 크게 分布되어 있지만, 이 境遇는 週期가 매우 길고, 護岸의 位置가 汀線地點이므로 無次元 越波量 算定에 있어서 L_0 의 값을 平均水位 上昇量을 考慮해서 計算했기 때문이다.

實線은 人工Reef를 設置할 때의 無次元 越波量을 式(21)에 式(22)를 代入하여 計算한 값을 나타낸 것이다. 自然海濱에서 碎波領域에 設置한 境遇의 無次元 越波量은 重複波 越波量 보다 아주 큰 것을 알 수 있으며, 이는 前面波高 H_0 만의 影響이 아니고, 碎波에 의해서 發生하는 平均水位 上昇量(wave set up)이 越波에 크게 寄與하고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 人工Reef上的의 越波量은 碎波領域의 無次元 越波量과 거의 같은 傾向을 갖는 것은 強制碎波에 의한 波의 性質이 비슷하다는 것을 意味한다.

그러나 人工Reef의 길이를 충분히 취하면 再生波 領域에서는 重複波 領域 越波量과 비슷한 값을 갖는다. 따라서 人工Reef上的의 無次元 越波量은 重複波 領域에서 碎波領域의 中間에 分布함으로써 遷移 領域의 越波量으로 看做할 수 있다. 따라서 入射波를 人工Reef 先端에서 強制碎波시킴으로 인해서 越波量이 減少하는 機構는 強制碎波의 碎波機構가 충분히 糾明되지 않는 한 매우 어려운 課題라고 생각된다.

3.5 人工Reef上的의 不規則波의 越波量 算定

前述한 波浪變形에 대한 波別解析의 檢證을 한 結果, 거의 妥當性이 認定 되었다. 不規則波의 越波量을 算定하기 위해서는 人工Reef에 대한 越波量 推定도 波別解析法이 可能한가를 檢討할 必要가 있다. 이것이 可能하다면 規則波의 實驗資料에서 不規則波의 越波量의 算定이 可能하고, 不規則波群을 一波 一波씩 分離시켜 波高, 週期가 같은 規則波의 越波量과 對應시켜서 統計의으로 一致한다고 한다면 이들을 合算함으로써 不規則波의 越波量을 求할 수 있다.

規則波와 不規則波의 一致는 各各의 波의 特性이 一致하는 것이 아니고, 越波量이 一致 하는 것이다. 따라서 不規則波의 越波에 대한 機構가 完全히 解明되지 않은 現在 規則波와 不規則波의 越波에 대한 差異를 分明히 하기는 매우 困難하다. 그러나, 不規則波의 有義波高에 對應하는 規則波(代表波)를 造波시켜서 護岸을 規則波의 波高와 같게 設置하면 越波量은 發生하지 않지만, 不規則波에 대해서는 越波量이 發生 한다. 이것이 規則波와 不規則波의 越波量의 差異이며 不規則波에 대한 越波量의 特性이다. 이와같이 不規則波에 대한 越波의 特性이 人工Reef上에서는 研究되지 않았다. 여기서는 規則波의 越波量 算定 q_i 를 使用하여 人工Reef를 設置함에 대한 越波量 推定方法을 確立한다. 不規則波에 대한 總 越波量은 다음式으로 주어진다.

$$\bar{Q}_{total} = \sum_{i=1}^N q_i \quad (23)$$

여기서 N 는 不規則波의 波數, q_i 는 不規則波의 i 번째 該當하는 規則波의 越波量 算定式(21)에서 求한 값이다. 식(23)의 越波量 算定特徵은 越波가 發生하는 堤防前面 水深에서 不規則波의 一波, 一波에 대해서 碎波한 波가 越波할 경우, 重複波가 越

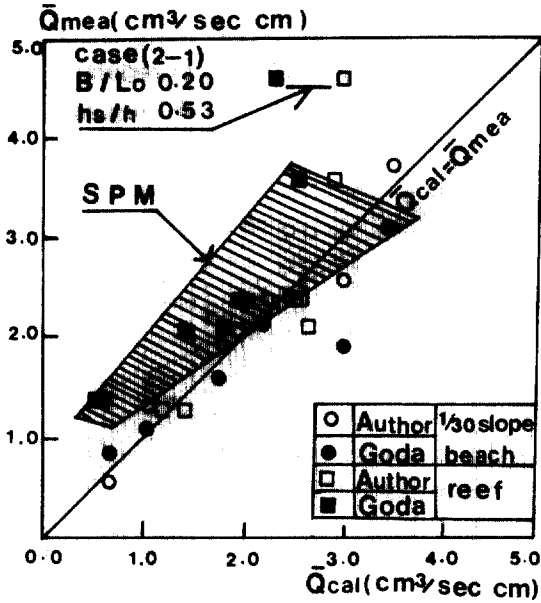


그림 12. Application of overtopping volume by random wave for artificial reef

波할 境遇, 人工Reef의 波가 越波할 境遇에 대해서 波浪의 淺水變形을 해서 越波량을 推定하는 方法이다. 合田의 越波量¹⁰⁾을 算定하는 方法과 큰 差異를 보이고 있는 개념은, 合田은 波高分布만을 가지고 越波량을 算定했고, 여기서는 越波하는 波의 性質 즉 波浪의 特性을 考慮한 點에서 크게 다르다.

그림 12는 不規則波에 의한 越波량의 計算値와 實驗値의 比較를 한 것이다. 縱軸은 實驗에서 求한 越波量이며, 橫軸은 計算에서 求한 값이다. 圓은 海底傾斜가 一定한 境遇의 著者가 實驗에서 求한 값이며, 검은원은 合田의 期待 越波流量 計算法에서 求한 값이다. 計算 및 實驗의 越波량을 比較하면 약간은 分散되어 있지만, 越波現狀 그 自體가 매우 複雜하고 越波에 미치는 變數가 많은 것을 勘案할때 이 두개의 方法은 충분히 不規則波에 대한 越波量 算定이 可能하다. 아울러 式(21)의 q_i 算定에 크게 寄與하는 K 가 높은 精度로 計算 된다면, 不規則波의 越波량이 충분히 推定 可能하다.

한편, 人工Reef를 設置했을때 不規則波의 越波量 算定을 위하여 合田의 期待越波量을 利用하여 人工Reef上에서의 越波量 推定方法의 妥當性을 밝힌다. 그림중에서 圓 四角形은 不規則波의 波浪變形을 考慮해서 計算한 값과 實驗값을 比較한 것이며, 검은

四角形은 本 實驗에 대해서 合田의 算定式을 適用해서 求한 計算값이다. 圓 四角形은 人工Reef길이 ($B/L_0: 0.20, h_s/h: 0.53$)가 짧은 2點을 除外하면 計算과 實驗이 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 이들 두점에 대해서 波浪變形中 $H-T$ 의 結合分布를 보면 P_{13} 地點의 計算값 보다 P_{13} 의 實驗값에서 高波 ($H>6cm$)가 存在하고 있음을 알 수가 있다. 이들을 除外하면 波浪變形에서 求한 計算 및 實驗값의 $H-T$ 結合分布가 잘 一致하며 그에 따라서 越波量도 잘 一致한다는 것을 알 수 있다. 따라서 人工Reef의 長이를 어느 程度 길게 하면 波別解析法이 충분히 適用 可能하다는 것을 알았다.

한편, 검은 四角形은 計算값이 過小評價 되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 合田의 計算方法은 波高分布만으로 計算되며, 아울러 人工Reef를 無限히 길게한 境遇의 越波量이 計算되기 때문이다. 따라서 合田의 計算方法에 의한 越波량은 人工Reef에서 實際보다 적다.

한편, 本 모델의 適用性을 檢討하기 위하여, 그림 12中에서 圓 四角形의 越波量에 대하여 人工Reef의 諸元을 考察하기로 한다. 그림에서 빗금친 部分은 自然海濱에서 發生하는 越波량을 Shore protection manual의 計算을 通하여 各點에 대해서 上限値와 下限値를 連結하여 圖示한 것이다. 越波량이 많을수록 誤差가 크게 發生하고 있음을 알 수 있으며, SPM의 方法으로 計算한 값은 人工Reef上의 越波量 보다 크게 나타내고 있다. 또한 人工Reef上의 越波량은 대체로 SPM의 上, 下限値의 內部에 包含되어 있다. 表1의 越波量 測定CASE는 波浪變形과 越波量 實驗에 使用한 不規則波의 $H_{1/3}$ 에 相應하는 規則波의 波高를 使用하여 碎波點을 設定한 다음 人工Reef의 높이와 長이를 變化 시켰다. 越波量 測定場所는 P_{13} 地點이며 Reef의 길이 및 높이를 變化시키면서 越波량을 測定했다.

그림 12에서, Reef의 長이가 짧은 境遇 表 1의 (2-1) 計算에서 求한 越波량은 實驗에서 求한 越波量보다 30% 적게 算定되고 있다. 外의 境遇는 算定값과 實驗값은 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 이점(3.0 $cm^3/sec/cm$)에 대해서는 波浪變形의 $H-T$ 의 結合分布에 高波浪이 많이 存在하며 이는 人工Reef가 짧기 때문에 Reef先端에서 強制碎波한 波浪이 Reef의 長이에 따라서 점차 減衰되지 않고, 強制碎波하

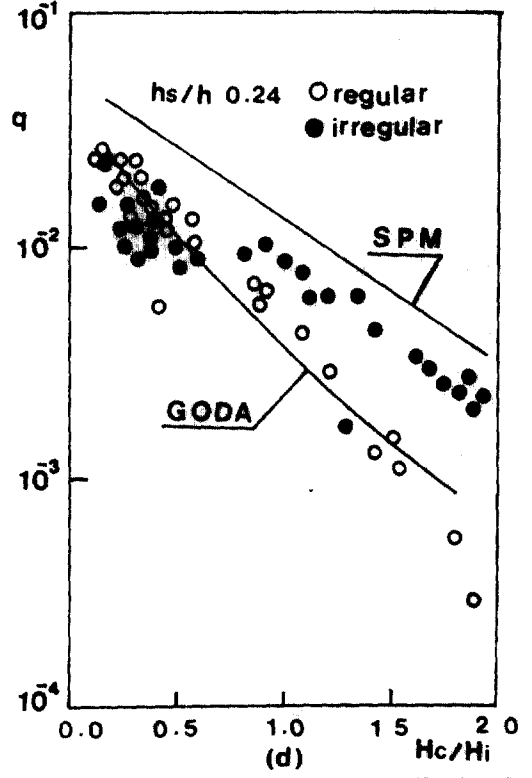
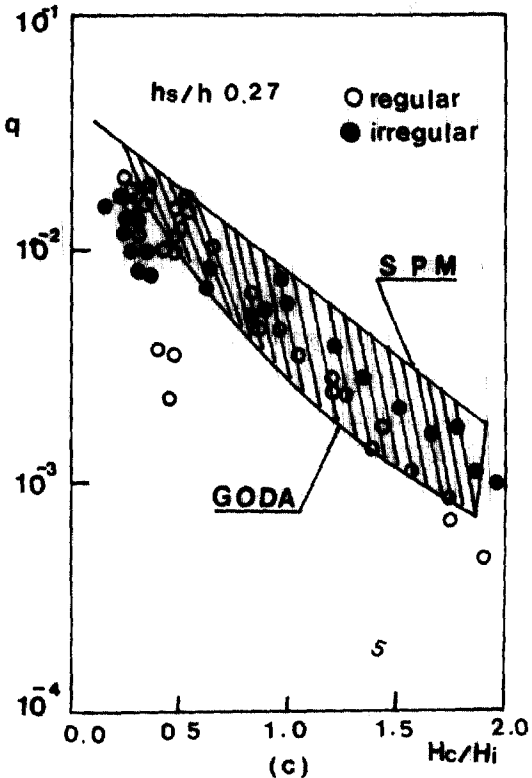
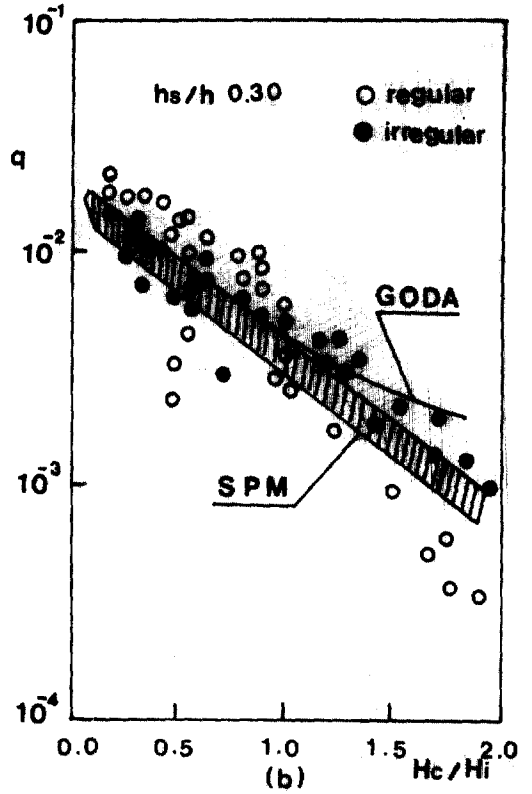
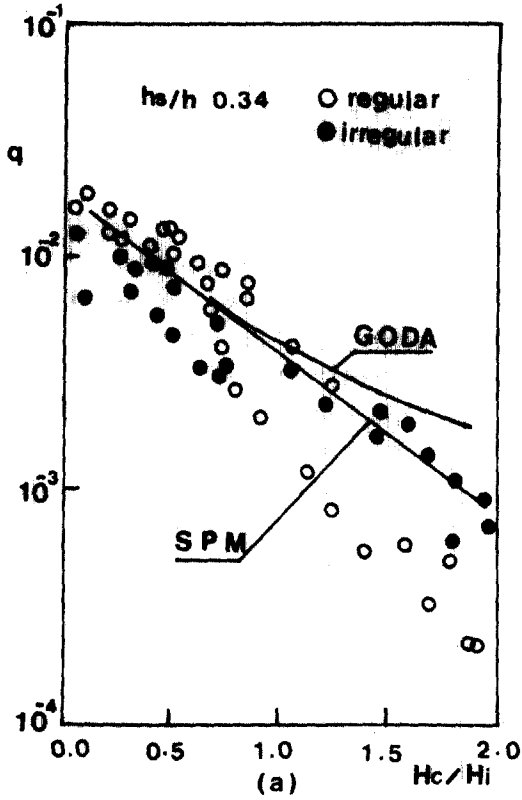


그림 13. Characteristic of overtopping rate between regular wave and irregular wave for artificial reef.

여 곧바로 越波하는 것으로 推定된다. 따라서 人工 Reef의 越波量 算定方法에 있어서 人工Reef上的 H-T의 結合分布의 計算과 實驗이 잘 一致하면, 越波量의 推定을 正確히 할 수가 있다. 또 人工Reef上的 H-T結合分布를 잘 一致시키기 위해서는 人工 Reef의 先端을 碎波点 보다 깊은 곳에 設置 해야하며, Reef의 높이는 波浪을 減衰시키는 效果가 큰 範圍 內에서 낮게 하는 것이 좋다.

3.6 人工Reef上的 規則波와 不規則波의 越波量 特性

自然海濱에서 不規則波와 規則波가 越波로 因해서 發生하는 越波量은 크게 差異가 있다는 것이 合田¹²⁾에 의해서 言及 되었다. 卽, 不規則波 $H_{1/3}$ 에 該當하는 規則波를 發生시켜서 護岸을 規則波로 設定 하고서 實驗을 하여 보면 規則波는 越波量이 거의 發生하지 않으나 不規則波는 越波量이 發生하여 不規則波에서 越波가 發生하는 理由는 우선 $H_{1/3}$ 보다 큰 $H_{1/10}$, H_{max} 의 파고가 존재하여 越波가 發生하며, 또 하나는 비록 波高가 $H_{1/3}$ 보다 작다 하더라도 不規則波群에서 먼저 가는 波가 뒤에 오는 波에 미치는 影響(相互干涉)들이 越波量에 影響을 미치고 있는 것으로 看做된다. 이것은 波와 波사이의 相互干涉을 統計的으로 處理하여 糾明하는 것으로 相互干涉이 강하다고 보는 見解¹³⁾와 그렇지 않는 경우¹⁴⁾로 兩分되어 있는 實情이다.

그림13인 人工Reef上的 不規則波와 規則波의 越波量을 比較한 것이다. 各 그림의 H는 不規則波의 $H_{1/3}$ 에 該當하는 波高를 設定하여 H_c 를 變化시키면서 越波量을 測定했다. 그림13의(a), (b)는 大體的으로 水深이 얇은 곳에 人工Reef를 設置했을 때의 越波量을 比較한 것이고, 그림13의 (c), (d)는 碎波点보다 깊은 곳에 人工Reef를 설치 했을때의 越波量을 比較한 것이다. 淸원은 規則波의 越波量이고, 검은원은 不規則波의 越波量이다. 그림(a), (b), (c), (d)에서 共通의으로 나타나는 現狀은, $H_c/H_1=1$ 을 起点으로해서 $H_c/H_1<1$ 의 領域에서는 規則波의 越波量이 不規則波의 越波量보다 많고, $H_c/H_1>1$ 領域에서는 規則波의 越波量보다 不規則波의 越波量이 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 $H_c/H_1=1$ 를 變曲點으로 看做하면 規則波로 現地模型 實驗을 하여 護岸의 높이를 決定할 경우 高波浪에 대해서는 過大設計가 되어 安全은 하나 非經濟的인 側面이 있고 底波浪에 대해서는 過少設計가 되어 經濟的이나

危險性을 內包하고 있다. 따라서 日本에서는 護岸 背後地의 重要度를 勸案하여 護岸의 높이를 決定하고 있지만, 現在는 大部分의 構造物 設計에서는 最大波高를 設計波高로 算定하고 있다. 또한 h_c/h 의 값이 적을수록(水深이 깊은 곳에 Reef先端을 設置 할때)總越波量은 減少하는 傾向을 보이고 있지만, 그림(d)의 $H_c/H_1>1$ 의 範圍에서는 規則波와 不規則波의 越波量의 差가 점점 커지고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 人工Reef가 길어지면서 設置水深이 깊어지기 때문에 아주 큰波를 除外하고는 大部分의 Reef先端을 通過하는 것으로 看做된다. 人工 Reef上的 越波量이 어떤 範圍에 分布되고 있는가를 調査하기 위하여 合田, SPM方法을 適用하여 그 範圍를 評價하기로 한다.

그림(a), (b)는 比較的 設置水深이 얇은 곳으로서, 合田의 越波量이 SPM方法보다 큰 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림(c), (d)는 設置水深이 깊은 곳으로서 SPM¹⁵⁾의 方法이 合田의 方法보다 큰 越波量을 算定 하고 있다. 이들 方法에 대한 評價는, Douglass¹⁶⁾에 의해서 研究되고 있으며, 自然海濱의 깊은 水深($h/H>3$)에서는 SPM方法으로 設計하는 것이 가장 安全하다고 指摘하고 있다.

本 研究에서도 人工Reef의 設置水深이 깊어질 수록(그림c, d) 上限値는 SPM方法보다 적으며 下限値는 合田 方法보다 크다는 것을 알 수 있다.

4. 結 論

本 研究에서는 海岸의 防災面과 利用面을 同時에 考慮한 人工Reef를 對象으로 研究를 進行하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 人工Reef上的 不規則波의 波浪變形 Model을 確立 하였다.

2) 護岸前面의 波浪諸元을 利用하여 無次元越波量을 表示하여 既往의 越波資料를 分析하여 再整理 하였다. 그 結果 無次元 越波量이 작은 重複波 領域, 無次元越波量이 많은 碎波領域으로 分離되며, 人工Reef를 設置한 경우의 無次元 越波量은 重複波 領域의 越波量에 接近한다.

3) 越流 모델을 擴張하여 碎波領域까지 利用可能하게 하였고, 人工Reef를 設置한 경우의 不規則波 越波量이 충분히 推定 可能하게 하였다.

4) 人工Reef를 設置하여 人工Reef上的 波浪變化에 대한 H-T 結合分布, 그리고 H-T 結合分布가 越

波量에 미치는 效果를 把握하여 越波量에 미치는 人工Reef의 諸元을 밝혔다. 同時에 規則波와 不規則波의 越波量 特性을 分析하였다.

謝 辭

이 研究의 一部는 1989. 3-1990. 2 韓國科學財團의 研究費 支援으로 修行되었다. 韓國科學財團에 깊은 感謝를 드린다. 아울러, 本 研究에 깊은 助言을 해주신 日本 大阪大學 Sawaragi, T.教授, Deguchi, I.助教授께 感謝를 드린다.

참 고 문 헌

1. Park, S. K., Sawaragi T, I. Deguchi: Reduction of overtopping rate by the use of artificial reefs, *proc. of 21th International Conf. on coastal Eng.*, pp. 335-349, 1988. 6.
2. Park, S. K., Sawaragi T, I. Deguchi: Experimental study on the function of submerged break water to control cross-shore sediment transport on artificially nourished beach, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, No1. pp. 121-130, 1988.
3. Shuto, N. :Nonlinear long wave in a channel of variable section, *Coastal Engineering in Japan* Vol. 17, pp1-12, 1974.
4. Goda, Y: The Index of Wave breaking point, *proc. of J. S. C. E* No180, pp39-49. 1970(in Japanese)
5. Battjes, J. A: *Energy dispersion in breaking and periodic waves*, Manuscript, Delft University of Technology, 1978.
6. Longuet Higgins and R. W. Stewart: Radiation Stress and mass transport in gravity waves, with application to surfbeat, *J. Fluid.*, Vol. 13, pp 481-504, 1972
7. Sawaragi, T, Iwata K. :Variation of wave set up (down) due to irregular wave, *proc. of 25th Japanese Conf. of Coastal Eng.*, pp184-188, 1978. (in Japanese)
8. Stive, M. J. F: Velocity and pressure field of spilling breaking, *proc. 17th on coastal Eng. Conf.*, pp547-566, 1980.
9. Mase, H. and Y. Iwagaki: Wave height distribution and grouping in surf zone, *Proc. 18th Coastal Eng. Conf.*, pp58-76, 1982.
10. Kikawa H. and F. Khuno: Fundamental study on wave overtopping on seawall, *proc. of 14th Japanese Conf. on coastal Engineering*, pp118-122(in Japanese)
11. Goda, Y: *Random seas and design of maritime structure*, Univ of Tokyo press, 323p.
12. Goda, Y. :The study of overtopping volume due to production seadike, *Reft. port and Harbour Res. Inst.* Vol. 9 No4, 1970(in Japanese)
13. Rye, H: Wave group formation among storm waves, *proc of 14th ICCE*, pp164-183, 1974.
14. Ewing, J. A: Mean length of runs of high waves, *Jaur. Geophys. Res.*, Vol. 78, No. 12 pp1933-1973, 1973.
15. Us Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, *Shore protection Manual*, 3rd Ed., US Government printing office Washington, D. C, Vol. 2, pp7-52, 1977.
16. Scott L. Douglass: Irregular wave overtopping rate, *proc. of 19th International Conf. on Coastal Eng.*, pp316-327, 1984.

(接受: 1990. 2. 19)