捨石構造物의 安定性에 관한 水理模型의 縮尺効果

Scale Effects of Stability Parameters in the Hydraulic Model Tests of Rubble Mound Coastal Structures

柳 青 魯*
Ryu, Cheong Ro

Abstract

Scale effects of stability, run-up, run-down and reflection of layered coastal structures are investigated through the experiments with 7 kinds of hydraulic scale models. The occurrence mechanism and the control method of scale effects are also discussed. As a result, it is found that the similarity of permeability of inner layers plays an important role in the occurrence of scale effects, which has been neglected in the most of conventional model tests. To assure the best scale effects for permeable coastal structures, control of Reynolds numbers of the porous media flow in each layer is recommended. It is also found that Reynolds numbers in revetment, filter, and core layer must be greater than 2×10^4, 3×10^3, and 1×10^3, respectively.

要 旨

海岸構造物의 安定性과 斜面上의 反射波, run-up, run-down 등 흐름特性에 대한 模型의 縮尺効果 發生 메카니즘과 그 制御 方法을 7種의 縮尺模型에 의해 實驗的으로 硏究하였다. 그 結果, 從來의 많은 硏究者들이 소홀히 해 왔던 構造物 內部의 浸透流 特性의 相似 如否가 縮尺効果 發生의 가장 重要한 要因임을 指摘하였다. 海岸構造物 가운데서 특히 透過性 構造物의 縮尺効果 制御를 위해서는 被覆層, filter層, 被覆層에 가까운 core 部의 浸透流 Reynolds 數가 各各 $Re>2\times10^4$, $Re_f>3\times10^3$, $Re_c>1\times10^3$ 인 條件을 만족하도록 構造物 各 層의 縮尺을 決定하는 것이 바람직함을 强調하였다.

1. 序 論

港灣 및 海岸構造物의 計劃 및 設計에는 水理模型實驗에 의해 決定하지 아니할 수 없는 變數가 적지 않다. 이 模型實驗을 위한 縮尺은 實驗對象 構造物 또는 水域의 크기와 實驗施設의 規模 및 實驗經費 또는 實驗의 能率 등을 綜合的으로 考慮하여 決定해야 할 必要가 있다.

이 模型縮尺의 基本은 相似則이며 模型은 實物과 形狀, 運動, 作用力의 3가지에 대해 相似되지 않으면 안된다. 波浪에 관한 問題에서는 流體의 粘性抵抗과 表面張力의 影響이 比較的 작은 것으로 생각하여 Froude 相似則에 따라 模型을 縮尺하는 것이 慣例化되어 왔다. 그러나 構造物의 特性에 따라 粘性抵抗이나 表面張力

* 正會員·釜山水產大學 助敎授, 海洋工學科

등의 影響 程度가 달라서 특히 海岸의 捨石構造物 周圍의 複雜한 水理現象을 對象으로 한 模型實驗 結果의 信賴度는 충분히 검토돼야 할 必要가 있다. 이러한 問題에 관해서는 Wilson and Cross[1], Sollit and BeBok[2], Vasco Costa[3] 또는 樋木 등[4~6] 많은 研究者들이 그 重要性을 指適하고 있다. 그러나 이들 過去의 研究는 경해진 實驗條件에서의 縮尺効果의 發生限界를 論議한 것으로 縮尺効果 發生의 原因 究明을 통한 模型 縮尺方法의 改善 등 縮尺効果의 制御를 위한 研究結果를 찾아보기 어렵다.

本 研究는 海岸 傾斜構造物의 安定性 및 斜面上의 反射波, run-up, run-down 등 흐름特性에 影響을 미치는 水理諸元에 대한 縮尺効果의 發生限界와 메카니즘을 究明하여 海岸構造物의 安定性에 관한 模型 縮尺効果의 制御 方法에 대하여 研究檢討하고자 한 것이다.

2. 海岸構造物 模型의 縮尺効果에 대한 影響因子

海岸 捨石構造物의 安定性은 다음 式과 같은 變數의 函數關係로 나타낼 수 있다.

$$f\left\{\begin{matrix}V_w, g, \rho_r, \rho_w, \mu, E_v, \sigma_w, H, L_0, h_0,\\ h_c, \theta, l_a, d, \Delta, r_a, l_c, e, q, i, \beta, D\end{matrix}\right\}=0 \tag{1}$$

여기서

f : { }의 函數
g : 重力加速度
ρ_w : 海水密度
E_v : 體積彈性係數
H : 入射波高
h_0 : 防波堤 先端의 水深
θ : 斜面傾斜
d : 被覆石의 粗度高
r_a : 被覆層의 두께
e : 空隙率(%)
i : 防波堤前方의 海底傾斜
D : 破壞率(%)
V_w : 斜面上의 水粒子速度
ρ_r : 被覆石의 密度
μ : 粘性係數
σ_w : 表面張力
L_0 : 深海波의 波長
h_c : M.S.L 로부터의 天端高
l_a : 被覆石의 代表徑
Δ : 被覆石의 形狀係數
l_c : core 部 材料의 代表徑
q : 浸透水의 假想流速
β : 入射波의 入射角

式(1)을 π 定理로서 無次元化하여 單位體積當의 水中重量과 Froude 數의 곱으로 安定性을 나타내고 彈性力과 表面張力에 의한 縮尺効果를 無視하면 式(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_s=f\left\{\begin{matrix}Re, l_a/h_0, H/L_0, h_0/L_0, d/l_a, ql_c/\nu,\\ h_c/H, r_a/l_a, i, \beta, \Delta, \theta, D, q/\sqrt{gl_c}, e\end{matrix}\right\} \tag{2}$$

여기서

$$\left.\begin{aligned}&V_w=f\sqrt{gH}\\&\nu=\mu/\rho_w\\&\gamma_r=\rho_r g\\&l_a=\Delta(W_a/\gamma_r)^{1/3}\\&Re=\sqrt{gH}\,l_a/\nu\\&N_s=\gamma_r^{1/3}H/[(\gamma_r/\gamma_w-1)W_a^{1/3}]\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

같은 方法으로 構造物 斜面上의 反射率 K_r 및 run-up(R_u), run-down(R_d)에 대한 縮尺効果 發生의 影響因子로서 다음 式과 같은 無次元量을 얻을 수 있다.

$$K_r=f\left\{\begin{matrix}Re, l_a/h_0, \xi, h_0/L_0, d/l_a, h_c/H\\ r_a/l_a, \theta, i, \beta, e, ql_c/\nu, q/\sqrt{gl_c}\end{matrix}\right\} \tag{4}$$

$$\frac{R_u}{H}\text{ and }\frac{R_d}{H}=f\left\{\begin{matrix}Re, l_a/h_0, \xi, h_0/L_0, d/l_a, h_c/H\\ r_a/l_a, \theta, i, \beta, e, ql_c/\nu, q/\sqrt{gl_c}\end{matrix}\right\} \tag{5}$$

式(3), (4), (5)의 右邊에 있는 捨石 Reynolds 數(Re)와 浸透流 Reynolds 數(ql_c/ν) 以外의 無次元量을 一定하게 한 Froude 相似則에 의해 模型을 縮尺할 경우 縮尺効果는 주로 이 두 가지 Reynolds 數에 基因함을 알 수 있다.

3. 實驗 및 資料解析

3.1 實驗裝置

實驗은 길이 26.6m, 幅 1.5m, 높이 1.8m 의 片面可視 2次元 大型水槽(그림 1(a))와 길이 30m, 幅 0.7m, 높이 0.95m 의 片面可視 2次元 造波水槽(그림 1(b))를 사용하였다. 水槽는 構造物

設置前의 入射波와 構造物 斜面上의 流況 및 破壞狀況을 同時에 測定할 수 있도록 隔壁板으로 2分割하였다. 分割한 水槽의 可視窓側에 模型構造物을 設置하고, 다른 쪽에서 入射波를 測定하였다(그림 1).

模型은 core 部와 被覆層으로 構成한 경우(그림 2(a)), core 部를 不透過性으로 하여 被覆層을 設置한 경우(그림 2(b)), 透過性의 core 部와 被覆層 사이에 filter 層을 設置한 경우(그림 2(c))와 不透過性 滑面狀態의 斜面(그림 2(d))을 對象으로 한 4가지의 代表的인 構造形式에 대하여 築造하였다. 傾斜構造物의 各層을 構成하는 材料는 각각의 縮尺模型에 대하여 Froude 相似則을 適用하여 表 1과 같이 變化시켰다.

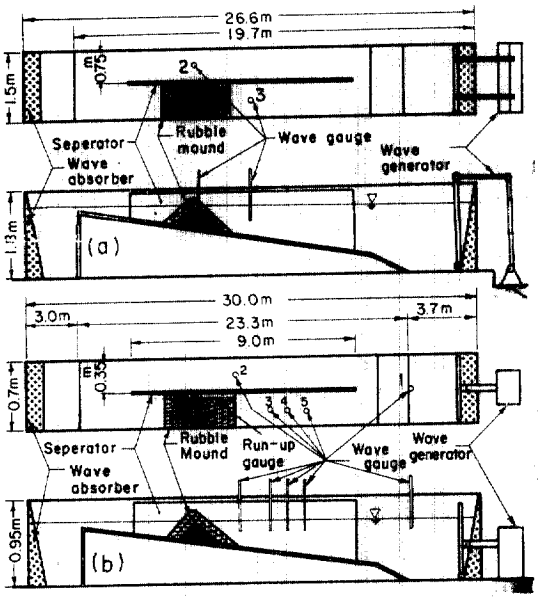

그림 1. Layout of test flumes.

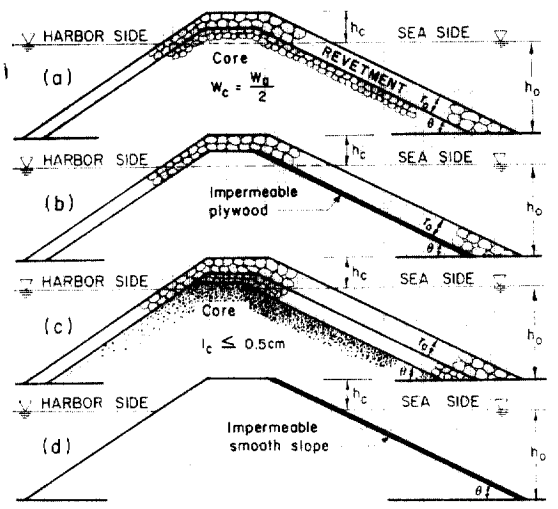

그림 2. Details of model breakwaters.

3.2 實驗方法

入射波는 現地波의 週期 5sec~20sec 를 對象으로 1sec 間隔의 各 週期波의 波高를 入射波가 碎波限界에 達하거나 被覆石이 完全히 破壞할 때 까지 段階的으로 增大시키면서 實驗하였다. 波高의 計測은 容量式 波高計를 그림 1과 같이 設置하여 波高計 No. 1은 外洋波, No. 2는 入射波, No. 3, No. 4, No. 5는 反射波를 測定하는데 사용하였다. 斜面上의 run-up, run-down의 測定에는 容量式 波高計를 改造하여 斜面에 附着시킨 run-up meter 를 製作·使用하였다.

防波堤 斜面上의 水粒子 速度는 往復流를 測定할 수 있는 mini propeller type 流速計를 使用함과 同時에 直徑 3mm의 포리우레탄製 tracer 를 投入·可視化하여 移動하는 被覆石의 움직임 및 run-up, run-down의 波形과 同時에 16mm 高速 cine camera 로 撮影(50 frame/sec)하여 測定하였다.

捨石의 安定性과 斜面上의 反射波 및 run-up 特性에 대한 實驗은 4種의 縮尺比를 달리하는 模型, 1/100 縮尺에 대한 3種의 構造形式과 不

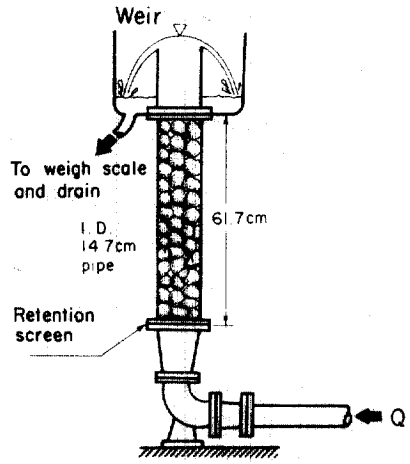

그림 3. Permeameter.

表 1. Experimental conditions of waves and breakwater models

Proto-type conditions		Scale models				Impermeable smooth slope models
		1/40	1/50	1/100	1/126	
W_a	20ton	310g	160g	20g	10g	
W_f	5~10ton	150g	80g	10g	5g	
W_c	5~10ton	150g	80g	10g	5g	
	0.1ton			l_c0.5cm		
	Impermeable	Plywood	Plywood	Plywood	Plywood	Plywood
Slope	1 : 1.5			1 : 1.5	1 : 1.5	
(θ)	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2	1 : 2
	1 : 3			1 : 3	1 : 3	
r_a/l_a	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
h_s	20m	50cm	40cm	20cm	16cm	
h_c	Nonover-topping	Nonover-topping	Nonover-topping	Nonover-topping	Nonover-topping	Nonover-topping
T(sec)	5.0~20.0	1.0~3.2	0.8~2.7	0.7~2.0	0.6~1.8	0.8~1.8
H(cm)	300~1500	7.5~40	6~30	3~15	3~12	3~15

W_a : weight of rubble for revetment,
W_f : weight of rubble for filter layer,
W_c : weight of rubble for core layer,
l_c : characteristic length of rubble for core layer,
h_s : water depth at the toe of breakwater,
H : incident wave height,
T : incident wave period,
r_a : thickness of revetment,
l_a : characteristic length of rubble for revetment,
h_c : crest elevation above the M.S.L.

透過性 滑斜面의 7種의 模型에 대하여 同一한 實驗條件下에서 反復 실시하였다. 한편, 그림 3과 같은 浸透計를 製作하여 各 縮尺模型의 core 部 材料에 대한 浸透流의 基本 性質을 調査하였다. 浸透實驗은 定常浸透實驗으로 材料를 바꾸면서 同一材料에 대하여 5回씩 反復實驗하여 그 平均値로서 透水係數를 決定하였다.

3.3 解析方法

(1) 反射率 및 run-up(R_u), run-down (R_d) 高의 算定

捨石構造物 斜面上의 反射率(K_r)은 다음 式(6)으로부터 구하였다.

$$K_r=H_r/H=(2\eta_{max}-H)/H \qquad (6)$$

여기서, H_r은 反射波高, H는 入射波高, $2\eta_{max}$는 防波堤 前方의 最大 水面變動量을 나타낸다.

한편, run-up meter로부터 얻어진 波形 및 cine camera의 寫眞은 平均水面(M.S.L)으로부터 run-up 先端까지의 垂直距離를 run-up高(R_u), run-down 先端까지의 垂直距離를 run-down 高(R_d)로 定義하여 解析하였다.

(2) 破壞의 定義 및 破壞率의 算定

被覆石이 初期位置로부터 그 代表徑(l_a) 以上의 距離를 移動하였을 때 破壞가 일어난 것으로 定義하고 捨石의 rocking 運動은 破壞에 포함시키지 않았다. 또 破壞率은 그림 4와 같이 安定斷面을 形成해 가는 捨石防波堤의 破壞特性을 考慮하여[7] 가장 심한 破壞를 일으키게 하는 入射波에 의해 破壞가 被覆層의 下部層(core 層 또는 filter 層)까지 進行한 경우를 100% 破壞로 定義하였다(그림 4의 A_0 斷面). 만약 어떤 波浪에 의해 그림 4의 實線과 같은 斷面型을 이루었을 경우의 破壞率(D)은 다음의 식(7)과 같이 계산하였다.

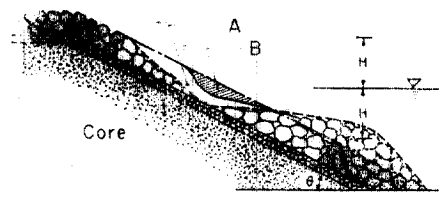

그림 4. Definition of the damage ratio.

$$D=A_0'/A_0 \qquad (7)$$

여기서, A_0' : 破壞部分의 斷面積

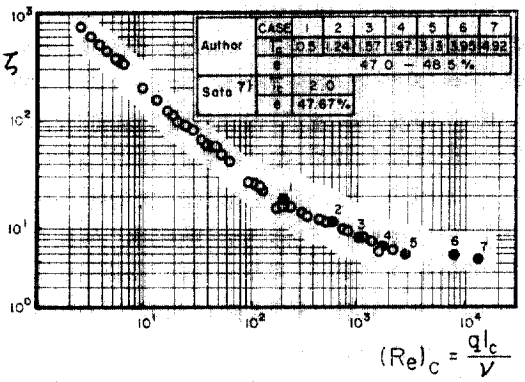

그림 5. Relations between the resistance coefficient and Reynolds number.

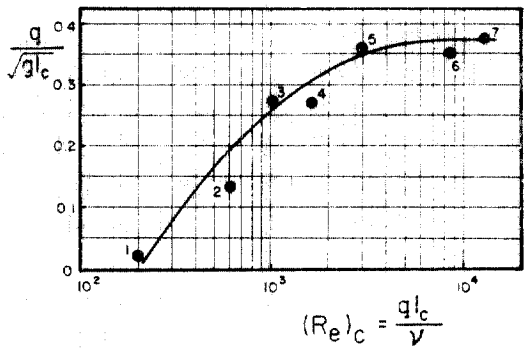

그림 6. Variation of Froude number in relation to Reynolds effects.

A_0 : 100% 破壞時의 斷面積

이러한 破壞率 算定法의 詳細한 物理的 意味는 椹木·柳[6]의 研究結果를 參考하되, 破壞率 100%의 意味는 捨石 個個의 漸進的 破壞 메카니즘으로부터 構造物 上部의 sliding 등 危險한 破壞狀態로 破壞狀況이 急變하는 破壞限界를 나타낸 것이다.

4. 海岸 捨石構造物 模型의 縮尺效果

4.1 Core 部의 浸透流에 대한 縮尺效果

式(3), (4), (5)에서 基本水理量의 하나인 堤內 浸透流의 特性을 檢討하는데 定常 浸透流實驗을 實施한 것은, 定常流와 振動流 사이에 抵抗係數의 差가 크지 않다는 Shuto and Hashimoto[8]의 結果를 參考한 것이다. 浸透流에 대한 縮尺效果의 原因이 된다고 생각할 수 있는 浸透流의 抵抗係數와 Reynolds 數와의 關係를 나타낸 것이 그림 5이다. 이 그림에는 佐藤[9]의 實驗結果를 同時에 나타내었다. 그림에서 浸透流의 Reynolds 數(Re_c)와 抵抗係數(ζ)는 각각 式(8)과 (9)로부터 구한 값이다.

$$Re_c = q\bar{l}_c/\nu \qquad (8)$$

$$\zeta = 2g\bar{l}_c i/q^2 \qquad (9)$$

여기서, q : 假想流速($=Q/A$, Q ; 浸透流의 流量, A ; 斷面積)

i : 動水傾斜

그림 5에서, 佐藤의 實驗結果는 均一粒徑(l_c=2.0cm)의 體積空隙率 e=47.67%에 대한 것이고, 本 研究의 結果는 混合石을 사용한 것으로 그림중에 나타낸 것과 같이 거의 같은 空隙率(e=47.0~48.5%)을 가지는 平均粒徑(粒徑의 標準偏差는 平均粒徑의 5% 以內)이 다른 7種類의 材料에 대해 水頭를 一定하게 하여 浸透流를 測定한 것이다. 이 그림에서 層流로부터 亂流로의 遷移는 徐徐히 일어나서 管水路의 경우처럼 限界 Reynolds 數를 넘으면 抵抗係數가 飛躍的으로 增大하는 現象은 볼 수 없으며 Reynolds 數가 10^3보다 커지면 抵抗係數는 거의 一定한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

또한 그림 6에서 浸透流의 Froude數($q/\sqrt{gl_c}$)는 $Re_c < 3\times10^3$에서 粘性抵抗에 의한 影響이 相似되어 있지 않음을 確認할 수 있다.

한편 實際 海岸構造物 斜面上의 up-rush, down-rush에 따른 構造物 內部의 水粒子運動은 被覆層 以下層으로 들어가면 미소한 距離 變化에도 水粒子運動은 크게 약해지기 때문에 그림 6과 같은 浸透流에 대한 縮尺效果와 結付시켜 斜面으로부터 어느 程度까지의 浸透流가 斜面上의 흐름特性 등에 影響을 미치는가를 究明해야 할 必要가 있다. 또 이 影響範圍內의 浸透流 特性을 相似시키기 위한 模型 縮尺方法의 檢討가 重要하다.

4.2 海岸構造物 斜面上의 흐름特性에 대한 縮尺效果

(1) 反射率(K_r)

斜面上의 反射波에 대한 縮尺效果 發生의 影響因子는 式(4)와 表 1의 實驗條件을 考慮하면

다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_r=f'[\xi(=\tan\theta/\sqrt{H/L_0}),\ H/h_0,\ Re,\ Re_c] \quad (10)$$

式(10)에서 H/h_0를 parameter로 놓고 反射率(K_r)의 surf-similarity parameter ξ에 따른 變化를 各 縮尺模型別로 나타낸 것이 그림 7이다. 各 模型에서 結果가 다르게 나타나는 것은 式(10) 중의 Reynolds 數에 의한 影響이라 할 수 있다.

反射率은 ξ의 增加에 따라 커지는 傾向을 보이나 不透過性 滑面模型과 1/126 縮尺模型 및 不透過性 core를 가진 1/100 縮尺模型의 $\xi\geq 3.0$ 領域에서 다른 縮尺模型에서보다 크게 나타나서 縮尺效果의 發生을 確認할 수 있다. 또 1/100 縮尺模型 中 不透過性 core를 가지고 filter層이 없는 경우와 1/126 縮尺模型의 反射率은 比較的 잘 一致함을 볼 수 있다. 이것은 1/126 縮尺模型의 core部 浸透抵抗이 커짐에 따라 不透過의 경우와 類似한 結果로 나타난 것이라고 생각할 수 있다.

그런데 filter層을 가진 경우, core部 材料로서 가장 작은 碎石($\bar{l}_c$=0.5cm)을 使用하였음에도 불구하고 反射率에 대한 縮尺效果는 나타나지 않았음을 알 수 있다. 이는 filter層을 設置함에 따라 core部 材料가 相對的으로 작아져도 縮尺效果가 發生하지 않는 것으로, 斜面上의 up-rush, down-rush에 直接的인 影響을 주는 被覆層을 포함한 斜面直下部層의 浸透流에 대한 粘性抵抗이 重要한 縮尺效果 發生要因임을 알 수 있다.

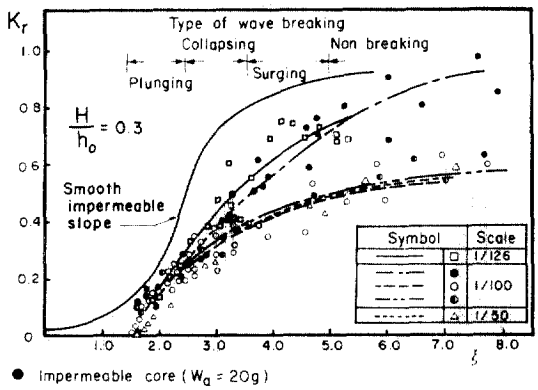

그림 7. Scale effects in wave reflection.

있다.

한편, 透過性 構造物에서의 反射率은 斜面上의 碎波型과 粗度에 의한 energy 逸散 및 透水性의 差에 의한 影響을 받는다. 그림 7의 上部에 나타낸 碎波型을 보면 plunging 領域($\xi<2.5$)에서는 反射率에 대한 縮尺效果를 볼 수 없다. 그러나 surging 및 非碎波領域($\xi>3.5$)에서는 上述한 縮尺效果가 나타났다. 따라서, 碎波가 심한 現象을 포함하는 模型에서는 縮尺效果를 볼 수 없으나, 斜面上의 水粒子 速度가 작은[6] 碎波가 微弱한 경우에는 構造物 內部의 透水性에 대한 Reynolds 數의 效果로 縮尺效果가 發生하게 된 것으로 생각할 수 있다.

이러한 結果로부터 縮尺效果 發生의 限界를 本質的으로 論議할 경우, 模型의 縮尺率만으로 限界를 決定하는 것은 困難하며 斜面上 또는 filter層 內部流動의 Reynolds 數로서 限界를 論議함이 바람직하다고 할 수 있다. 그림 6과 같은 結果와 表 1의 實驗諸元을 考慮하면 反射率에 관한 縮尺效果를 없애기 위해서는 filter層의 浸透流 Reynolds 數를 10^3 以上으로 하고, 被覆層의 Reynolds 數를 3×10^3 以上이 되도록 考慮해야 함을 알 수 있다.

(2) Run-up, Run-down

式(5)와 表 1의 實驗條件을 考慮하면 構造物 斜面上의 run-up, run-down에 대한 縮尺效果의 發生因子는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_u/H \text{ and } R_d/H = f'(\xi,\ H/h_o,\ Re,\ Re_c) \quad (11)$$

式(11)의 관계를 檢討하기 위해 構造物 斜面

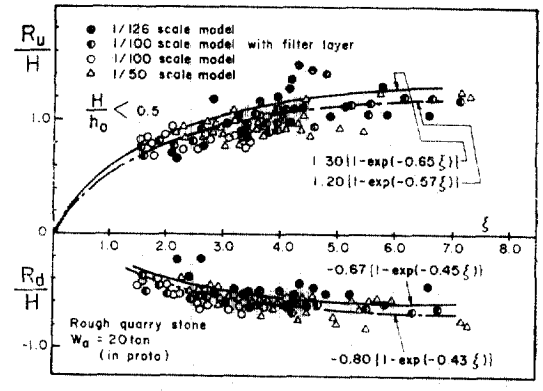

그림 8. Scale effects in wave run-up and run-down.

上의 run-up과 run-down에 관한 實驗結果를 나타낸 것이 그림 8이다. 反射率에 대한 縮尺效果의 發生에서와 같이 1/100 縮尺模型 以上의 大型模型에 있어서는 run-up, run-down의 ξ에 따른 變化 特性에 대한 有意할만한 差를 發見할 수 없으나 1/126 縮尺模型에서는 run-up의 경우 10% 程度 큰 값을, run-down의 경우 10% 程度 작은 값을 보이고 있으며 그 最適線은 各各 다음 式과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left.\begin{aligned}\frac{R_u}{H} &= 1.30[1-\exp(-0.65\xi)]\\ \frac{R_d}{H} &= -0.67[1-\exp(-0.45\xi)]\end{aligned}\right\}$$

(for 1/126 scale model) (12)

$$\left.\begin{aligned}\frac{R_u}{H} &= 1.20[1-\exp(-0.57\xi)]\\ \frac{R_d}{H} &= -0.80[1-\exp(-0.43\xi)]\end{aligned}\right\}$$

(for large scale model) (13)

從來의 硏究에 의하면 run-up은 斜面上의 흐름에 대한 粘性抵抗의 影響을 크게 받지 않는 것으로 報告된 바 있다[1,2,4]. 그러나 core部의 浸透流는 低 Renyolds數이기 때문에 本 硏究에서와 같이 透過性 構造物을 對象으로 할 경우는 core部 透水性에 대한 粘性抵抗의 效果가 斜面上의 流動에 미치는 影響을 무시할 수 없다.

反射波에 대한 縮尺效果의 發生 메카니즘과 같은 方法으로 생각하면, 1/126 縮尺模型에서는 up-rush時 core部의 높은 粘性抵抗에 의해 不透過性 構造物 斜面上에서의 run-up이 增大되는 傾向과 類似하게 增大되고, run-down이 작아지는 것은 粘性抵抗의 增大에 의해 浸透한 물이 down-rush時 斜面上으로 流出하기 어렵게 되어 斜面上의 down-rush와 內部로부터의 流出水의 位相差가 發生하는 데 基因하는 것으로 생각할 수 있다.

4.3 捨石構造物의 安定性에 대한 縮尺效果

捨石의 安定性에 대한 影響因子로서 式(3)과 表 1의 實驗條件으로부터 다음 式과 같은 縮尺效果 發生 因子를 얻을 수 있다.

$$N_s=f(Re,\ Re_c,\ \xi,\ H/h_0,\ D) \qquad (14)$$

捨石構造物 被覆材의 安定性에 관한 5種의 縮尺模型을 사용한 實驗結果로부터 初期破壞時(D=0%) 및 破壞率 15%時에 대한 安定係數(N_s)와 斜面上의 捨石 Reynolds數(Re)의 관계를 나타낸 것이 그림 9이다. 여기서 捨石 Reynolds數의 計算에는 斜面上의 實測 最大流速을 使用하여 구한 것이다. 그림중의 2點鎖線과 實線은 各各의 破壞率에 대한 最適線이고 一點鎖線은 Hudosn[10]의 結果(K_D=5.0)이고 破線은 著者등[5]의 捨石構造物 破壞 메카니즘에 관한 硏究에서 指摘한 斜面上 前後波 間의 共振現象에 의한 初期破壞時의 傾向을 나타낸 것이다. 이 그림에서 同一 模型의 N_s값이 分散을 보이는 것은 그림 10의 $N_s-\xi$관계로 나타낸 바와 같이 破壞에 대한 斜面上의 共振 및 波浪週期의 影響 때문이다.

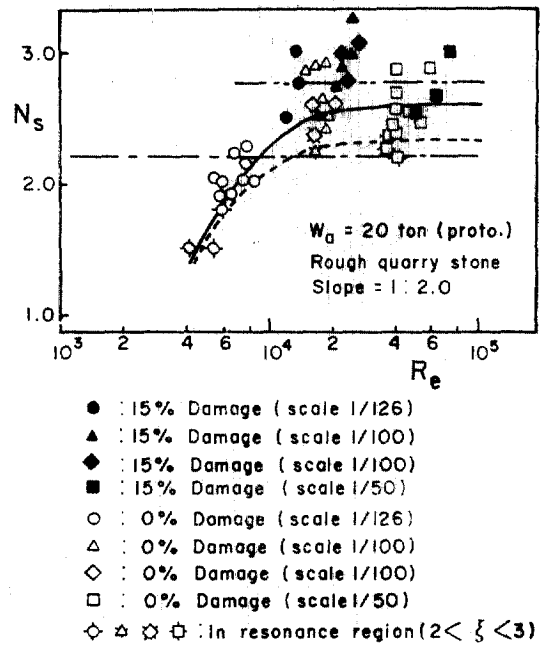

그림 9. Scale effects in stability.

그림 9에서 破壞가 進行한 D=15%일 경우에는 Re의 變化에 따른 N_s의 變化를 볼 수 없으나 初期破壞時에는 $Re<2\times10^4$에서 1/126 縮尺模型의 N_s값이 작아진 것을 確認할 수 있다. 이러한 縮尺效果는 斜面上의 Reynolds數가 작아짐에 따라 捨石個體의 抗力係數(C_D)의 增大에

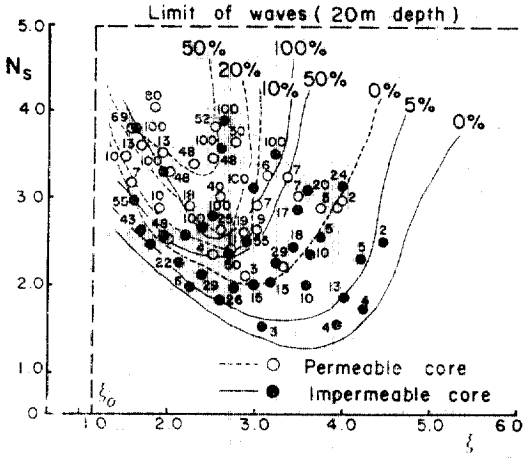

그림 10. Change of stability criteria due to change of core materials.

基因함을 우선 생각할 수 있다. 한편, 捨石構造物 內部 殘留水壓의 上昇效果[11]와 浸透流의 抵抗增大에 따른 反射率 및 run-up의 增大 또한 重要한 N_s減少 原因으로 생각할 수 있다. 이것은 그림 10과 같이 core部를 不透過性으로 했을 경우 透過性 core를 가진 경우보다 安定性의 低減效果가 크게 나타나는 實驗結果로부터 알 수 있는 것이다. 또 그림 10중의 숫자는 實驗條件別 破壞率을 나타낸 것이다.

以上의 結果로부터 斜面上의 捨石 Reynolds 數로서 安定性에 대한 縮尺效果를 論議할 수 있으며, $Re>2\times10^4$의 領域에서는 縮尺效果를 考慮하지 않아도 좋으나, $Re<2\times10^4$의 領域에서는 縮尺效果에 의해 發生하는 不安定 要因을 충분히 檢討해야 할 必要가 있다. 또 斜面上의 流動에 影響을 주는 core部의 透水性에 대한 相似가 重要하며, 이를 위하여는 浸透水의 抵抗係數에 縮尺效果가 發生치 않도록 浸透水 Reynolds 數를 3×10^3보다는 크게 해 주어야 할 必要가 있음을 指摘할 수 있다.

5. 結 論

本 硏究에서는 海岸構造物의 安定性 및 흐름特性에 대한 模型의 縮尺效果를 Froude 相似則에 따른 7種의 縮尺模型을 使用한 實驗結果로부터 論議하였다. 얻어진 重要한 結果로부터 縮尺效果 發生의 메카니즘과 그 制御方法에 대해 要約하면 아래와 같다.

(1) 捨石構造物 斜面上의 흐름特性에 대한 捨石構造物 內部 浸透流의 影響은 매우 重要하며, 特히 波動流의 出入이 많은 被覆層에 가까운 filter層 또는 core部의 浸透流 Reynolds 數를 3×10^3 以上이 되도록 縮尺해야만 縮尺效果의 發生을 막을 수 있다.

(2) 反射率(K_r) 및 run-up, run-down에 대한 縮尺效果는 1/126 縮尺模型에서 發生하였다. 이 경우의 反射率은 1/100縮尺模型의 不透過性 core를 가진 경우와 같은 分布를 나타내었고, run-up은 10% 增加되고, run-down은 10% 減少하였다. 이는 透水性에 대한 粘性抵抗의 增大效果가 core部의 透水能을 低下시킴으로서 縮尺效果를 發生시킨 것이며 이는 浸透流 Reynolds 數가 3×10^3 以上이 될 수 있는 2層 以上 積의 filter層을 築造함으로서 防止할 수 있다.

(3) 捨石構造物 安定性에 대한 縮尺效果도 1/126 縮尺模型에서 나타났으나 縮尺效果의 發生限界는 縮尺率에 의한 表現보다는 浸透流 및 斜面上의 捨石 Reynolds 數로서 論議함이 바람직하다. 이런 관점에서 捨石構造物 斜面上의 흐름特性과 安定性에 대한 縮尺效果의 發生限界는 filter層의 浸透流 Reynold 數 $Re_f\leq3\times10^3$, 被覆層과 가까운 core部의 浸透流 Reynolds 數 $Re_c<1\times10^3$, 斜面上의 捨石 Reynolds 數 $Re\leq2\times10^4$ 程度로 各各의 Reynolds 數를 限界値보다 크게 하는 模型縮尺이 바람직하다.

(4) 從來에 흔히 無視되어 온 core部의 透水性을 충분히 考慮해야 함은 以上에서도 指摘하였으나 특히 不透過性 構造形式으로 模型을 縮尺할 경우 安定性 및 斜面上의 흐름特性이 크게 歪曲되어 나타남에 注意해야 한다.

謝 辭

本 硏究는 1985年度 後半期 韓國科學財團의 차관연구비 지원과제인 "海岸構造物의 安定性과 波浪制御機能을 考慮한 最適化 設計法"에 관한 硏究의 細部課題로 이루어진 것이며, 財團에 深甚한 感謝의 뜻을 표한다.

参 考 文 献

1. Wilson, K.W. and R.H. Cross, "Scale effects in rubble-mound breakwaters", *Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, 1972, pp. 1873～1884.
2. Sollit, C.K. and D.H. BeBok, "Large scale model tests of placed stone breakwaters", *Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, 1976, pp. 2572～2588.
3. Costa, F.V., "Rubble-mound breakwaters as dissipators of wave energy", *The Dock & Harbour Authority*, 1981, pp. 368～371.
4. 樋木亨, 柳青魯, "捨石防波堤安定實驗 における scale effects", 昭和 57 年度土木學會關西支部講演概要集, 1982, pp. Ⅱ-91-1～Ⅱ-91-2.
5. Sawaragi, T., C. Ryu and K. Iwata, "Considerations of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to the resonance phenomenon," *Proc. of 8th International Harbour Congress*, Belgium, 1983, pp. 3. 197～3. 208.
6. 樋木亨, 柳青魯, "捨石防波堤の被災プロセスと被災確率との關係について", 第19回 自然災害科學總合シンポジウム講演概要集, 1982, pp. 97～98.
7. Ryu, C.R. and T. Swaragi, "Wave control functions and design principles of composite slope rubble mound structures", *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 29, 1986, pp. 227～240.
8. Shuto, N. and H. Hashimoto, "Hydraulic resistance of artifical concrete blocks," *Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, 1970, pp. 1587～1599.
9. 佐藤邦明, "地下水の浸透機構に關する基礎的研究" 大阪大學博士學位論文, 1972, pp. 164～208.
10. Hudson, R.Y., "Laboratory investigation of rubble mound breakwaters", *Jour. of Waterways and Harbour Div., WW3, ASCE*, 1959, pp. 93～121.
11. Bruun, P. and P. Johannesson, "Parameters affecting stability of rubble mounds", *Jour. of Waterway, Harbour and Coastal Eng. Div., WW2, ASCE*, 1976, pp. 141～164.

(接受：1987. 4. 23)