

# 移動床 海岸水理模型實驗에 있어서의相似律에 관한研究

A study on the similarity of Coastal hydraulic model experiment of movable bed.

釜山大學 副教授 梁 嶽 模  
東亞大學 教授 閔 丙 亨  
密陽農藝專門大學 助教授 玉 致 律

## 1. 序論

海岸水理模型實驗에 있어서力學的相似關係를困難하게 하는 가장 큰原因은 모래등의底質의 크기를波나構造物과 같은縮尺으로 할 수 없기 때문에模型에 있어서의底質의移動이現地와相似가 되지 않는 것이다. 即底質縮尺의決定이고, 다음은海濱地形變動에 있어서의時間縮尺의決定일 것이다.

本研究는海濱地形變動에 관한水理模型實驗에 있어서의底質縮尺과時間縮尺을決定하는 한方法을提議하고, 現地海濱에 있어서의再現性を檢討한 것이다.

## 2. 底質縮尺의決定法

底質의縮尺을決定하는基本的인方法에는

- (1) 移動限界水深 또는 底質移動量이相似하게 逆算한다.
- (2) 海濱断面形狀이相似하게 逆算한다.
- (3) 底質의移動形態(浮游인가, 掃流인가)를相似시킨다.

라고 하는 3가지의方法이 있다. 그러나 위 세條件을 모두滿足시키는 것은移動床模型實驗에서는不可能하다.

만약 (1)의 경우를 택한다고 하고, 또模型底質로서 原型海岸과 同-比重을 가진 것을採用한다면 現在提議되고 있는 모든移動限界式에 있어서의底質粒徑의效果는 어떤 길이의縮尺(예컨대波高 또는波長)으로서無次元化되어 포함되고 있기 때문에模型底質의粒徑은Froude則으로縮尺하게 되므로模型底質의粒徑이 너무 작게 되어서剪斷抵抗

속에 内部摩擦 以外에 粘着力이 加해져서 그 剪断特性이 原型的 海濱砂라는 判別한 것이 되고 만다.

또 (2)를 택하는 경우 一般的으로 堆積型인가, 浸蝕型인가를 判別하는 基準中 現地 및 實驗室의 兩縮尺에 均適用되는 것은 아직까지 提案되고 있지 않다. 예컨대 實驗室縮尺으로서 砂村, 樁木, 尾崎 등이 提案한 判別基準이 있다.

(3)의 경우는 一般的으로 浮遊狀態의 漂砂는 離岸方向으로 移動하기 쉽고, 掃流狀態의 漂砂는 陸岸方向으로 移動하기 쉽다고 한다.

따라서 原型과 模型에 있어서의 底質의 移動型態를 같도록 한다는 것은 換言하면 模型에서 생기는 海濱斷面을 原型의 海濱斷面과 같게 한다고 하는 底質의 縮尺을 決定하는 하나의 有力한 手段이 되고 있다. 一般的으로 河川에 있어서의 流砂는 樁木에 의하면

$$\frac{U_*}{w_0} > 1.0 \quad U_* : \text{摩擦速度}, w_0 : \text{沈降速度} \quad \dots (2-1)$$

이면 浮遊가 始作되고, 1.7보다 크게 되면 掃流砂量에 比해서 浮遊砂量이 많다고 한다. 한편 海岸에 있어서도 樁木 등의 實驗的 研究에 의하면

$$\frac{U_*}{w_0} > 1.0 \quad \text{이면 } \text{掃流砂量} \text{보다 } \text{浮遊砂量} \text{이 많다고 한다.}$$

따라서 本實驗에서는 局所洗掘을 포함한 海濱의 斷面變化를 對象으로 하고 있으므로 이  $U_*/w_0$ 를 一致시키는 底質相似則에 의하여 底質 粒徑은 決定하기로 하였다.

一般的으로 碎波后의 漂砂移動이 激甚한 領域의 底部剪断에는 實驗室縮尺에 있어서도 亂流의 抵抗則을 使用하게 된다. 따라서 摩擦速度  $U_*$ 는 Froude則으로 縮尺하게 된다. 즉

$$\frac{w_{0m}}{w_{0p}} = \frac{U_{*m}}{U_{*p}} = (\lambda)^{1/2} \quad \lambda : \text{幾何學的縮尺} \quad \dots (2-2)$$

한편 沈降速度는 底質粒徑, 流体의 粘性係數 등의 複雜한 函數가 된다. Yalin<sup>1)</sup>에 의하면  $\frac{\sigma d_{50}^3 g}{\nu^2} < 50$  (比重 2.65의 모래인 경우,  $d_{50} < 0.015 \text{ cm}$ )의 範圍에서는 Stokes의 抵抗則에 따라  $w_0 \propto d_{50}^2$  이 되고,

한편  $\frac{\sigma' d_{50}^3 g}{\nu^2} > 10^6$  ( $d_{50} > 0.4 \text{ cm}$ )의 範圍에서는 亂流의 拖抗則에 따라  $\omega_0 \propto d_{50}^{1/2}$  이다.

$\omega_0 \propto d_{50}^2$  으로 나타나는 경우는 式 (2-2)로부터

$$\frac{d_{50m}}{d_{50p}} = \left( \frac{\omega_{0m}}{\omega_{0p}} \right)^{1/2} = (\lambda)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

이 되고, 尾崎 등의 判別式에 應 底質粒徑에 따른 適用限界가 있다.

한편  $\omega_0 \propto d_{50}^{1/2}$  라는 나타나는 領域에 있어서는 式 (2-2)로부터

$$\frac{d_{50m}}{d_{50p}} = \left( \frac{\omega_{0m}}{\omega_{0p}} \right)^2 = \lambda \quad \dots \dots \dots (2-4)$$

가 되고, 底質縮尺은 幾何學的縮尺과 같게 되어 (1)의 相似條件에 符合한다. 또한  $0.015 \text{ cm} < d_{50} < 0.4 \text{ cm}$ 에서의 沈降速度는

$$\omega_0 \propto d_{50}^n, \quad 1/2 < n < 2 \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

로 나타내며, 式 (2-5)중의  $n$ 은 다시  $d_{50}$ 의 函數가 된다.

그러나 式 (2-5)중의  $n$ 의 函數形이 明白하지 않으므로  $d_{50p}$ 에 대한 沈降速度  $\omega_{0p}$ 를 Yalin의 圖表<sup>1)</sup>에서 읽고, 式 (2-3)의 관계로부터  $\omega_{0m}$ 을 구하고, 다시  $d_{50m}$ 을 이 圖表로부터 구하여 模型底質의 粒徑을 決定할 수가 있다.

따라서 우리들은 實驗對象 海濱이 있으면 式 (2-3), (2-4), (2-5) 중의 어느 하나를 模型底質의 粒徑 즉 底質縮尺이 決定될 것이다.

### 3. 時間縮尺의 決定法

地形變動의 時間縮尺은 漂砂의 連續方程式으로부터 決定된다.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \left( \frac{1}{1-\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial q_x}{\partial x} \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

式 (3-1)에 있어서의 各項의 模型과 原型的의 比가 같도록 하는 것으로 부터 地形變動의 時間縮尺  $\eta_t$ 는 다음과 같다.

$$\eta_t = \lambda^2 \cdot \eta_{(1-\varepsilon)} \eta_{q_x}^{-1} \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

그러나 空障率  $\varepsilon$ 은 模型과 原型的의 海底砂에서 거의 같다고 생각되어 지므로 결국 式 (3-2)로부터

$$\eta_t = \lambda^2 \cdot \eta_{q_x}^{-1} \quad \dots \dots \dots (3-3)$$

다시 일반적으로 海岸線과 直角方向 漂砂量  $q_x$ 는 Madsen<sup>2)</sup> 등에 의해

$$\frac{q_x}{w_0 d_{50}} \propto \left( \frac{U^2}{\sigma' g d_{50}} \right)^3 \dots \dots \dots (3-4)$$

그런데 2次元 海濱變形에 관한 實驗에 있어서는 波浪의 作用開始直后에 最大가 되고, 時間적으로 減衰해서 零에 漸近한다고 하는 海岸線과 直角方向 漂砂量의 時間變化를 考慮하지 않으면 안 된다. 이와 같은 海岸線과 直角方向 漂砂量의 時間變化에 대해서 樫木들<sup>3)</sup>은 다음式(3-5)와 같이 定式化해서 解析하고 있다.

$$q_x = q_{x_0} \cdot \exp(-A \cdot \frac{t}{T}) \dots \dots \dots (3-5)$$

여기서  $q_{x_0}$ 는 波浪의 作用直后( $t=0$ )에 있어서의  $q_x$ 의 最大値이다. 또  $A$ 는 係數이나 堆積性的인 波浪에 대한  $A$ 는 浸蝕性的인 波浪에 대한 것보다 큰 것이라 한다.

樫木들<sup>3)</sup>은 많은 研究者에 의한 2次元 海濱断面變形에 관한 實驗結果를 再整理하고,  $A$ 는 深海波特性을 使用한  $N_s$ 와의 相關關係를 Fig. 1과 같이 구하였다. 實驗値가 적고, 또 상당히 分散되어 있으나 그 값은  $A \propto N_s^4$ 으로 表示할 수 있다.

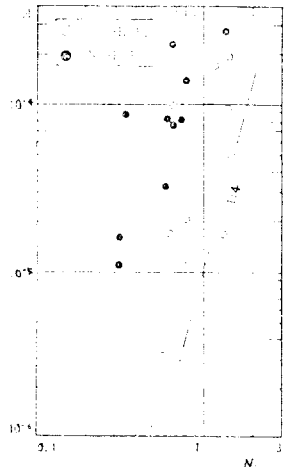


Fig. 1 Relation between  $A$  and  $N_s$

따라서 式(3-5)로부터  $q_x$ 의 縮尺은

$$n_{q_x} = n_{q_{x_0}} \exp\left\{-\left(A_m \frac{t_m}{T_m} - A_p \frac{t_p}{T_p}\right)\right\} \dots \dots (3-6)$$

이 된다. 여기서 模型과 原型에서 同-波數  $M$  만큼 波浪이 來襲한 后의 海岸線과 直角方向 漂砂量의 縮尺을 생각한다.

즉 式(3-6)에서  $\frac{t_m}{T_m} = \frac{t_p}{T_p} = M$ 이라 두고,

式(3-6)을 變形하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_{q_x} &= n_{q_{x_0}} \cdot \exp\left\{-\left(A_m \frac{t_m}{T_m} - A_p \frac{t_p}{T_p}\right)\right\} \\ &= n_{q_{x_0}} \cdot \exp\left\{-(MA-1)A_p M\right\} \dots \dots \dots (3-7) \end{aligned}$$

한편  $A \propto N_s^4$ 으로부터  $MA$ 는 다음과 같이 된다.

$$MA = n_{N_s^4} = n_{(U^2/\sigma'gd_{50})^4} = \lambda^2 \cdot n_{d_{50}^2} \dots \dots \dots (3-8)$$

다시 式(3-5)중의  $q_{x_0}$ 는 式(3-4)와 같이 나타내면 그 縮尺  $n_{q_{x_0}}$ 는

$$n_{q_{x_0}} = \left\{ \left( \frac{U^2}{\sigma'gd_{50}} \right)_m / \left( \frac{U^2}{\sigma'gd_{50}} \right)_p \right\}^3 \left\{ \frac{(w_0 d_{50})_m}{(w_0 d_{50})_p} \right\}$$

가 되고,  $n_u = n_{w_0} = \lambda^{1/2}$  을考慮하면  $n_{d_{50}}$ 는 다음式(3-9)과 같다.

$$n_{d_{50}} = \lambda^{1/2} \cdot n_{d_{50}}^{-2} \quad \dots \dots \dots (3-9)$$

式(3-3)에 式(3-7), (3-8) 및 (3-9)를 代入하면

$$n_{\tau} = \lambda^2 \cdot n_{d_{50}}^{-1} \cdot \exp\{(M_A - 1)A_p M\}$$

$$\therefore n_{\tau} = \lambda^{-3/2} \cdot n_{d_{50}}^{-2} \cdot \exp\{(\lambda^2 \cdot n_{d_{50}}^{-2} - 1)A_p M\} \quad \dots (3-10)$$

가 된다. 따라서 幾何學的 縮尺  $\lambda$ , 底質 縮尺  $n_{d_{50}}$  및 波浪의 作用時間  $M (= \frac{t}{T})$  이 決定되면 式(3-10)에 의하여 時間縮尺  $n_{\tau}$ 를 求할 수 있다.

#### 4. 再現성을 確認하기 위한 水理實驗

##### 4.1 實驗對象地域의 海濱狀況 및 海象

###### 1) 海濱断面形狀

海濱의 前濱의 깊이는 약 30m 이고, 어떤 곳은 防波堤에 의한 漂砂 堆積의 影響으로 약 80m 의 긴 前濱을 가진 곳도 있다. 또 汀線에서 7K深 약 6m 까지의 海底傾斜은 대략  $1/7$  로 가파르고, 그 보다 깊은 곳은  $1/25$  의 海底傾斜로 되어 있다.

###### 2) 底質特性

實驗對象地域의 汀線부근의 平均粒徑은 4~10mm, 7K深 3m 부근은 50~200mm, 7K深이 5m 보다 깊은 곳은 1mm 이하이므로 本實驗에서는 汀線 부근의 平均粒徑  $d_{50} = 5mm$  를 現地의 代表粒徑으로 보았다.

##### 4.2 實驗對象波浪의 決定

本實驗에서는 現地 海濱에서의 몇년동안의 週期, 波高 觀測 記錄으로부터 堆積성을 보이는 波浪中 가장 큰 값인  $H_0 = 1.5m$ ,  $T = 7sec$ , 또 冬期 波浪中 4種 및 既往 最大波浪인  $H_0 = 8.1m$ ,  $T = 13.3sec$  등 計 6種으로 하였다.

##### 4.3 模型縮尺의 決定

###### 1) 幾何學的 縮尺의 決定

本實驗에서는 實驗 7K槽의 3기 및 碎波의 縮尺效果에 대한 Diaphuis<sup>4)</sup> 의 實驗結果를 고려하여 幾何學的 縮尺  $\lambda = 1/30$  으로 했다. 이때

現地의 실험波浪은 다음 Table. 1과 같다.

2) 底質縮尺의 決定

Table. 1 Wave characteristics

Wave No.	H <sub>0</sub>		T (sec)		H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub>	N <sub>s</sub>
	model	field	model	field		
W-1	5.0 cm	1.5 m	1.28	7.0	0.0196	0.75
W-2	10.0	3.0	1.28	7.0	0.0391	1.51
W-3	13.3	4.0	1.83	10.0	0.0255	1.41
W-4	15.0	4.5	2.19	12.0	0.0200	1.32
W-5	27.0	8.1	2.73	13.0	0.0307	2.19
W-6	15.0	4.5	1.28	7.0	0.0588	2.26

$\omega_{op}$  를 Yalin의 圖表에서 읽어  $\omega_{op} = 44 \text{ cm/sec}$  를 구하고, 式 (2-2)로부터  $\omega_{om} = (\lambda)^{1/2} \omega_{op} = 8 \text{ cm/sec}$  가 되고, 이  $\omega_{om}$  에 대응하는  $d_{som}$  은 역시 Yalin의 圖表에서 읽어  $d_{som} = 0.05 \text{ cm}$  인 底質粒徑은 模型底質砂로 決定하였다. 이때 底質粒徑의 縮尺은  $\frac{d_{som}}{d_{so p}} = \frac{0.05 \text{ cm}}{0.5 \text{ cm}} = \frac{1}{10}$

3) 時間縮尺의 算定

時間縮尺을 決定하는 式 (3-10) 에  $\lambda = 1/30$ ,  $M_{dso} = 1/10$  을 代入하고, 整理하면  $\eta_{*} \approx 1.6 \exp(-0.9 A_p M)$  이 얻어진다. Table. 1로부터 現地の  $N_s (= N_{sp})$  는 1~2 의 값이므로 Fig. 1로부터 現地の  $A (= A_p)$  의 값은 外插하면 대략  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  이라 推定된다. 따라서 地形變動의 時間縮尺  $\eta_{*}$  는 造波開始 直後에는  $e^{-0.9 A_p M} \approx 1.0$  이므로  $\eta_{*} = 1.6$  이고 模型의 造波時間의 약  $1/1.6$  이 現地時間에 해당되나, 造波數  $M$  의 增加와 함께 時間縮尺은 指數函數的으로 減少해 간다. 現地  $A$  의 平均값은  $5 \times 10^{-4}$  정도이므로  $M = 100$  波에서  $\eta_{*} \approx 1.5$ ,  $M = 1000$  波에서  $\eta_{*} \approx 1.02$ ,  $M = 10000$  波에서  $\eta_{*} \approx 0.02$  본 실험對象波浪의 平均週期를 10 sec 라 하고, 이 波浪이 20 時間來襲했을 때  $M = 7200$  波가 되므로  $\eta_{*} \approx 1/16$  따라서  $t_m = 75$  分

#### 4.4 實驗種類

橋脚(用柱) 및 鉛直堤防은 實驗對象으로 하였고, 護岸 및 橋脚의 設置位置는 汀線 및 汀線의 初期平衡海濱에서의 最大潮上處 사이를 3 等分한 2 處를 採하였다.

#### 4.5 實驗裝置 方法

波高의 測定은 容量式 波高計에 의하였고, 또 海濱 断面의 測定은 砂面 測深器로 行하였다.

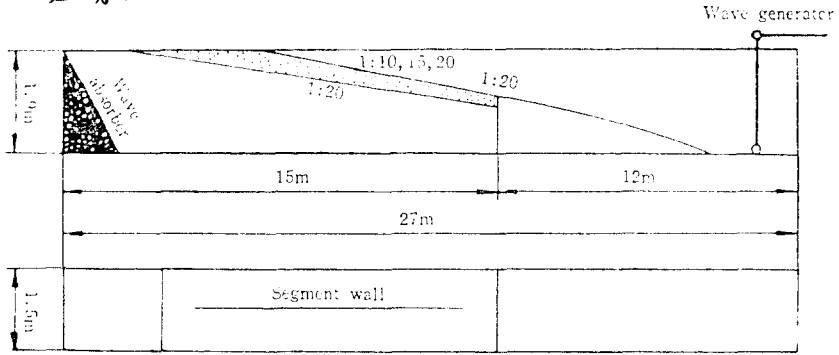


Fig. 2 Schematic representation of the experiment flume

#### 4.6 模型 實驗의 再現性

##### 1) 海濱 断面의 再現性

Fig. 3과 같이汀線에서 外海 쪽 50m (現地에서 15m), 水深 6cm (現地에서 1.8m)까지는 現地地形과 거의 같도록 再現되었고,

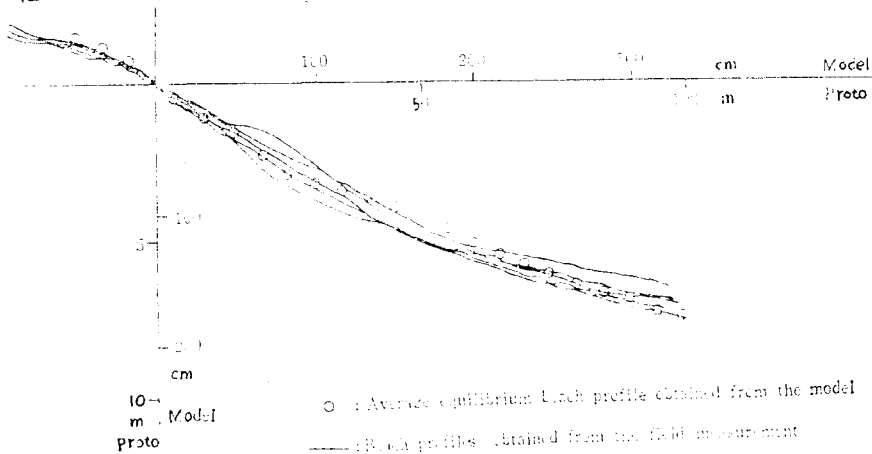


Fig. 3 Comparison between profiles of natural and model beach

汀線에서 100cm (現地에서 30m), 水深 12cm (現地에서 3.6m)까지는 약간의 差異는 있기는 하나 從來의 移動床 水理 實驗의 再現性에 比較해 良好한 再現性을 보이고 있다.

##### 2) 自然 海濱의 變形 過程에 있어서의 再現性

Fig. 4에서 Savage에 의해서 행해진 滑面의 漸上 高에 관한 實驗 結果를 土屋<sup>5)</sup>이 再整理한 實驗 曲線도 나타나 있다. Fig. 4에서 R/H<sub>0</sub>의 값들이 土屋들이 滑面에 대해서 구한 海底 傾斜 1/6의 曲線에 近接하고 있는

것은 本 실험의 一般性を 示할 수 있는 것이다.  
 洗掘深에 대한 實測值과 實驗值의 具體的인 예를 들면 Table. 2와 같다. 이는 田柱橋脚의 設置에 따른 各所洗掘深과 海岸堤防設置로 인한 橋脚地帯의 洗掘深을 각각 變動的 實驗에 의해 測定的 값은 1980년 12月24~25日 사이의 높은 波浪 (대략 W-6타 흡수함)에 의해 實測된 田柱橋脚의 洗掘深을 比較한 것이다. Table. 2에서나 같이

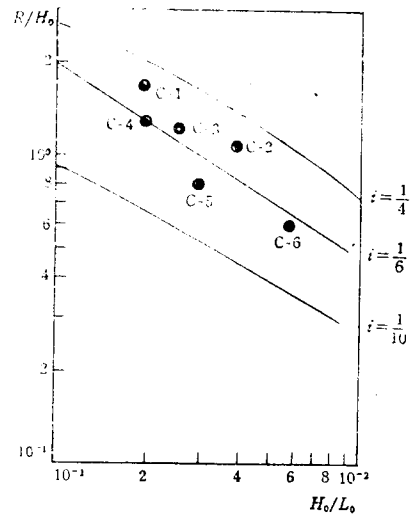


Fig. 4 Relation between  $R/H_0$  and  $H_0/L_0$

模型과 現地에서의 洗掘深의 값은 대안히 近似하다.

Table. 2 Comparison between the scour depth obtained from the experiments and observed in the field

Experiment Cases	Experiment		Field
	Model	Conversion	Scour depth
V-6-3	-7.2 cm	-2.16 m	—
C-6-3	-1.5 cm	-0.45 m	—
Total	-8.7 cm	-2.61 m	-2.80 m

### 5. 結 論

本 研究는 現地 海濱에서의 再現性を 確認할 수 있는 事例研究를 통하여 海濱地形變動에 관한 水理模型 實驗에 있어서의 가장 어려운 問題인 底質縮尺 및 時間縮尺을 決定하는 한 方法을 얻은 것이다.

實驗時間上 한 幾何學的 縮尺만에 대한 結果이므로 앞으로 研究를 繼續하여 나가겠다.