

透水性 防波堤 上部構造物の 形狀效果에 關한 研究 Shape Effects of Cap Concrete on Wave Transmission in Permeable Breakwaters

權赫珉* · 崔漢圭* · 金泰麟**

Hyuck Min Kweon*, Han Kyu Choi* and Tae In Kim**

要 旨: 東海岸 防波堤의 代表的인 斷面形態인 透水性 捨石防波堤에서 cap concrete의 形狀이 波浪의 透過 및 碎波에 미치는 效果를 究明하기 위하여 3가지 形態의 上部構造物에 대하여 港內 傳達波高에 關한 模型實驗을 2次元 造波水槽에서 實施하였다. 實驗結果, 堤防全面 水深이 크고 入射波의 週期가 길수록 港側에 일정간격의 apron을 설치한 有孔의 경우, 港側에 apron을 설치한 無孔의 경우, 그리고 apron이 없는 無孔의 경우 順으로 港內傳達 波高의 減少效果가 優秀한 것으로 나타났다. Apron을 설치한 有孔 cap concrete 構造가 優秀한 것을 水平方向으로 透過되거나 越波되는 波浪에너지가 上部構造物에 설치된 消散孔과 apron에 의해 일부 流失되어 港쪽으로 傳達되는 에너지가 減少하기 때문이다.

Abstract □ Hydraulic model experiments for permeable breakwaters with three different shapes of cap concrete were carried out in a two-dimensional wave channel to investigate the shape effects of cap concrete on transmission rate of the incident waves over the breakwaters. The model test results show that energy damping effects are significant in the following order: cap concrete with dissipation holes and apron, cap concrete with apron only, and cap concrete without dissipation holes and apron. It is concluded that the significant damping effects are due to energy dissipation of the incident wave as they pass through the holes and the apron.

1. 緒 論

港의 外廓施設인 防波堤는 施設費의 規模가 클 뿐 아니라 自然災害에 가장 露出되어 있고 被害復舊費도 莫大하여 安定하면서도 經濟的인 斷面構造의 設計가 要求된다. 防波堤에 關한 情報를 얻기 위한 跳波高, 越波量, 港內傳達波高에 關한 研究는 이미 오래전부터 行해져 왔다. 跳波高에 關한 研究는 主로 緩慢한 傾斜의 境遇에 대한 實驗的 研究가 行해졌고 越波量에 關한 研究는 制限的인 實驗條件에 대한 結果가 美陸軍의 S.P.M.(1977), Battjes(1974), Owen(1983) 등에 의해 報告된 바 있다. 또한, 越波에 따른 防波堤 背後의 傳達波高에 대해서는 Johnson 등(1951)의 實驗結果가 發表되어져 있다.

특히, 透水性 防波堤에서의 越波 및 透過에 의한 港內 波高傳達率에 대해서는 斷面構造의 多様な 變化要素 때문에 尙大한 實驗이 여러 研究者들에 의하여 試圖되었다. 그러나 防波堤 斷面要素 中 上部 concrete 構造의 形狀變化에 따른 防波堤 斷面의 特性에 關한 研究는 報告된 바 없는 바, 本 研究에서는 透水性 防波堤 上部 concrete 構造의 形狀이 傳達波高에 미치는 效果를 實驗的으로 糾明코자 하였다.

2. 理論的 背景

2.1 實驗條件을 위한 碎波浪界

波高는 다음의 2가지 碎波機構에 의해 制限된다. 深海中에서 波形 傾斜에 의해

*江原大學校 工科大學 土木工學科(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Choonchun, Korea)

**陸軍士官學校 教授部 土木工學科(Department of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea)

$$H_b/L_0 = 1/7 \quad (1a)$$

그리고, 淺海에서 相對波高에 의해

$$H_b/d = 0.78 \quad (1b)$$

여기서 H_b 는 碎波高, L_0 는 深海波長이며 d 는 防波堤 全面에서의 水深이다.

위의 두 가지 境遇가 一般的으로 碎波限界로 알려져 있다. 따라서 本 研究에 있어서 防波堤에 到達할 수 있는 非碎波 波高의 最大值는 水深의 0.78倍로 하였다.

2.2 反射率

線形理論에 의해 防波堤로의 入射波 η_i 와 防波堤로부터의 反射率 η_r 은 다음과 같이 주어진다.

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \sin \left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (2a)$$

그리고,

$$\eta_r = \frac{H_r}{2} \sin \left(\frac{2\pi x}{L} + \frac{2\pi t}{T} + \delta \right) \quad (2b)$$

여기에서 δ 는 位相差이다. 入射波와 反射波의 重疊은 partial standing wave로 나타나며 공간적 파괴의 envelope은 波高計를 水槽를 따라 천천히 움직임으로써 記錄紙上에 捕捉할 수 있다. 이 때 envelope의 最大波高 및 最小波高는 다음과 같이 나타난다.

$$H_{max} = H_i + H_r \quad (3a)$$

$$H_{min} = H_i - H_r \quad (3b)$$

따라서 入射波高(H_i) 및 反射波高(H_r)는 다음과 같이 얻어진다.

$$H_i = \frac{H_{max} + H_{min}}{2} \quad (4a)$$

그리고,

$$H_r = \frac{H_{max} - H_{min}}{2} \quad (4b)$$

反射係數(K_r)는 反射波高와 入射波高의 比로서 나타내어진다.

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (5)$$

이상은 線型波理論에 의한 Healy 방법으로 알려져 있다. 그러나 Goda(1969)에 의하면 波浪의 非線型性 때문에 어떤 條件에서는 Healy의 방법은 상당한 誤差를 보이는 것으로 판명되었다. 곧 入射波는 실제보다 크게, 反射波는 실제보다 작게 계산된다. Goda와 Abe(1968), Goda(1969)는 이 問題를 解決하기 위해 部分反射의 경우 3차 近似解까지 境界值 問題를 풀어 보정식을 구하고 이를 도표로 제시하였다. 本 연구에서는 Healy 방법에 의한 波高와 Goda 방법에 의해 수정된 波高의 計算偏差가 5%보다 큰 경우에는 Goda의 수정된 값을 채택하였다.

2.3 傳達波高率

透水性 防波堤 斷面의 傳達波는 越波와 透過에 의한 energy의 傳達에 의해 發生한다. 따라서 에너지의 傳達率 K_r 는 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$K_r = \sqrt{K_{T0}^2 + K_{T1}^2} = \frac{H_t}{H_i} \quad (6)$$

여기서, K_{T0} 는 越波에 의한 傳達率이며, K_{T1} 는 透過에 의한 傳達率이다.

2.4 相似法則

模型實驗에 있어서 가장 중요한 것은 原型과 模型의 相似關係이다. 대부분의 水理模型實驗에서는 물의 움직임을 다루기 때문에 幾何學的 相似性이나 運動學的 相似性에 비하여 動力學的 相似性을 보다 분명하게 檢討하여야 한다. 本 實驗에서는 Froude의 相似法則을 適用시켰다. Froude법칙에 의하면 길이와 시간에 대한 現場에서의 값(첨자 p) 모형에서의 값(첨자 m)은 다음과 같은 관계가 있다.

$$L_m = L_p/L_2, \quad T_m = T_p/\sqrt{L_2} \quad (7)$$

여기서 L_2 는 現場과 模型에서의 縮尺이다.

3. 實驗方法과 裝置

本 實驗의 對象은 東海岸의 代表的인 斷面形態로 江原道 三陟郡에 位置하고 있는 2種漁港인 草谷港에 建設된 捨石防波堤를 選定하였다. 斷面의 設計는 Shore Protection Manual의 基準에 따랐으며 1/40 縮尺($L_2=40$) 모델을 利用하여 本 實驗을 遂行하였다.

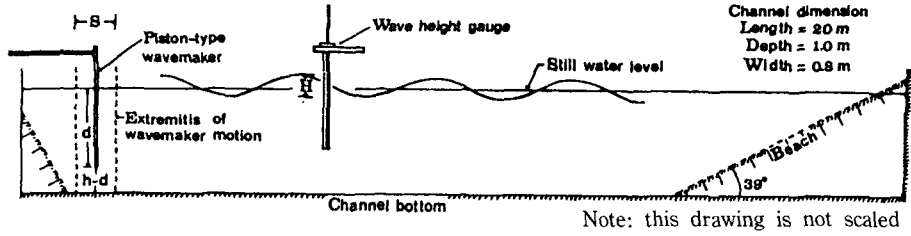


Fig. 1. Sketch of wave channel.

Table 1. Mean weight and standard deviation of model stones

Classification of stones	Prototype	Model	
	Weight	Mean weight	Standard deviation
Primary cover layer (T.T.P.)	12.5 tons	0.193 kg (0.195 kg)	0.002 kg
Under Layer	1.25 tons	0.0413 kg (0.02 kg)	0.164 kg
Core	0.063~0.003 tons	0.00009 kg (0.001~0.00005 kg)	0.00001 kg

() : After Froude Law

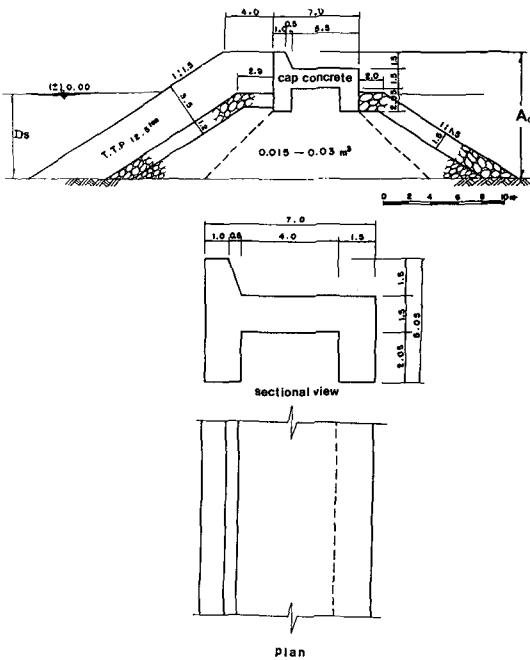


Fig. 2. Test section of permeable breakwaters (case I).

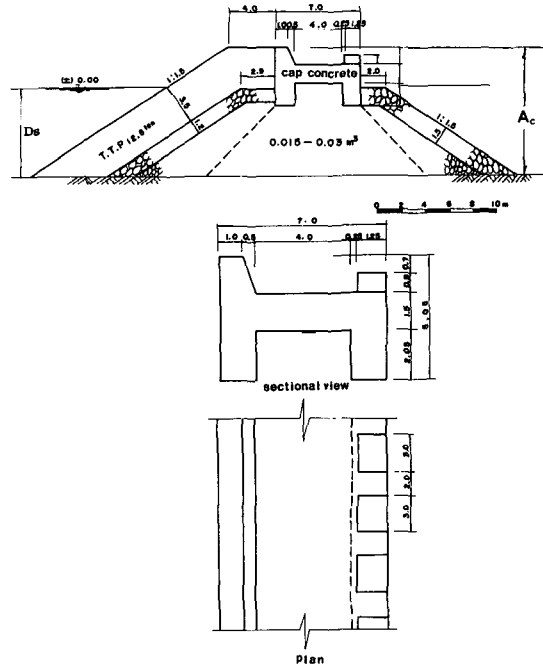


Fig. 3. Test section of permeable breakwaters (case II).

水理模型實驗은 江原大學校 土木工學科 水理實驗室에 設置된 길이 20 m, 폭 0.8 m, 높이 1.0 m의 造波水槽에서 實施되었다(Fig.1 참조). 實驗단면에 사용된 材料들의 平均값과 標準偏差는 Table 1과 같다.

위의 材料中 Under layer는 人爲的인 打說에 의해서

얻은 값이므로 標準偏差가 약간 크다. 實驗對象 斷面 各各의 경우 上部構造物の 形状效果를 고려하기 위하여 Case I(Fig.2)은 草谷港의 既存 斷面形狀을 利用하였고, Case II(Fig.3)는 上部 concrete 構造物の 港側上端에 apron을 設置하였으므로, Case III(Fig.4)는

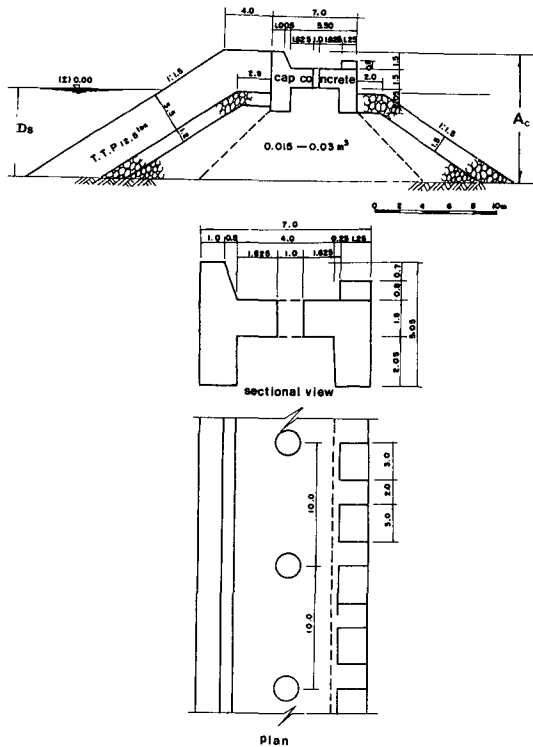


Fig. 4. Test section of permeable breakwaters (case III).

Case II의 形態에 消散孔을 設置하여 透過 및 越流水脈의 에너지가 減少되도록 計劃하여 實驗하였다. 實驗에 사용된 물은 깨끗한 상수도 물을 이용하였으며, 바닥경사는 設計時 現場條件을 考慮하여 1:10 傾斜로 하였다.

Diephuis(1985)에 의하면 實驗週期 T_m 이 1.3 sec ($T_p=8.2$ sec에 해당) 未滿으로 짧을 경우 實驗結果는 波高, 水深 및 堤防의 天端高 등 實驗諸元의 약간의 變化에 대해서도 큰 誤差가 發生할 수 있는 것으로 지적되었다. 따라서 實驗週期 T_m 은 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 sec ($T_p=12.6$ sec, 15.8 sec, 19.0 sec, 22.0 sec에 해당) 로 하여 觀察하였다. 防波堤의 全面水深 $D_{sm}=12.0$ cm, 16.0 cm, 18.0 cm ($D_{sp}=4.8$ m, 6.4 m, 7.2 m에 해당)의 세 경우에 대하여 波高 $H_m=3.0$ cm~21.0 cm ($H_p=1.2$ m~8.4 m)의 다양한 波浪條件을 適用하였다. 入射波高를 測定하기 위해 波高計를 서서히 움직이면서 抵抗線式 波高計로부터 容量式波高計 增幅機를 거쳐 記錄計(Unicorder)에서 波高의 envelope이 記錄되도록 하였으며, 最少한 2個(一般的으로 3個)의 envelope cycle이 觀測될 때까지 充分한 길이의 波

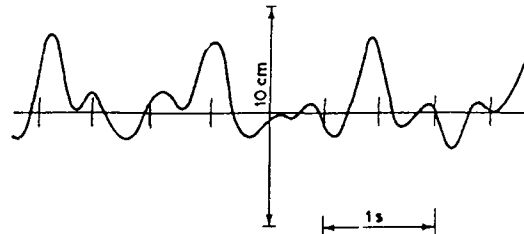


Fig. 5. Waves behind the breakwater.

形記錄을 얻었다. 入射波高는 水槽의 平坦面에서 測定하였으며 跳波가 一定할 때 모든 測定을 實施하였다. 傳達波高는 構造物의 背後에서 1 m 떨어진 곳에서 測定하였으며 傳達波形의 形態는 Fig. 5에 보인 바와 같이 入射波와는 달리 不規則波로 나타나며 上向通過 (zero-up-crossing) 方法으로 各成分波의 波高를 決定하여 有意波高($H_{1/3}$)를 決定하였다(Hamer and Hamer 1982). 단, 越波가 過多하여 港內의 水深變化를 增加시키는 경우, 測定은 2회의 同一한 條件에서 入射波高, 傳達波高를 各各 따로 測定하였다.

4. 實驗結果 및 考察

實驗結果는 前面水深 및 週期の 變化에 따라 整理 하였으며 各各 case 別로 比較하였다. 獨立變數는 入射波의 波形傾斜(H/L_0)에 2π 로 나눈 無次元 값 H_i/gT^2 을 취하였으며 從屬變數는 $K_t=H_t/H_i$ 의 傳達波高率로 하였다.

Run Group I은 $D_{sm}=12$ cm(天端高에 대한 前面水深의 比 $D_s/A_c=0.45$)인 경우로서 대표적인 實驗結果는 Fig. 6에 보인 바와 같다. Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 비교적 短波의 경우에는 越波나 碎波가 발생하지 않기 때문에 傳達率 K_t 의 값은 0.15이하이고 Cap Concrete의 形狀效果는 무시할 정도이다. 이는 透過에 의한 에너지만이 港內攪亂을 지배하기 때문에 예상되는 結果이다. 그러나 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 비교적 長波의 경우에는 碎波에 의한 傳達率의 增加와 Cap Concrete의 形狀效果를 볼 수 있다.

Cap Concrete의 形狀效果는 非碎波條件에서는 뚜렷하게 보이지 않으나 碎波條件에서는 Case III, Case II, Case I 順으로 傳達率의 減少效果가 양호한 것으로 나타났다.

Run Group II는 $D_{sm}=16$ cm($D_s/A_c=0.60$)인 경우

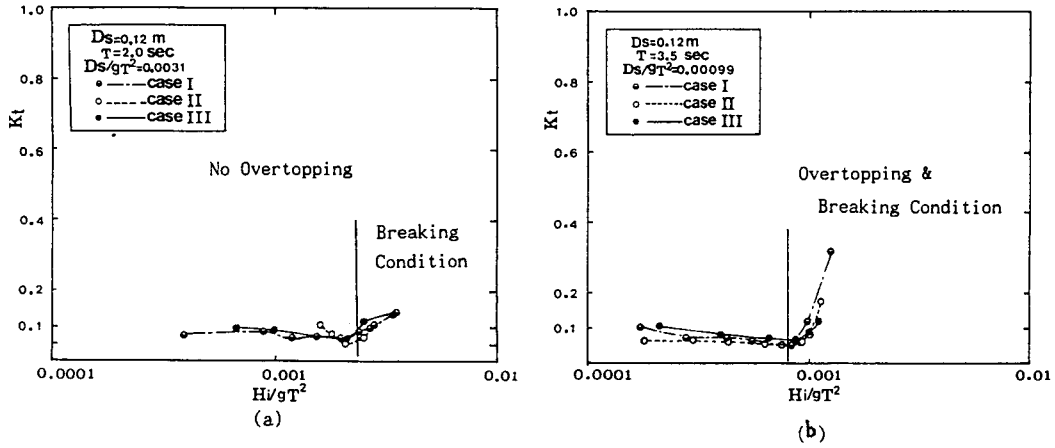


Fig. 6. Wave transmission through breakwater with tetrapod armor units. ($D_{aw}/A_c=0.45$).

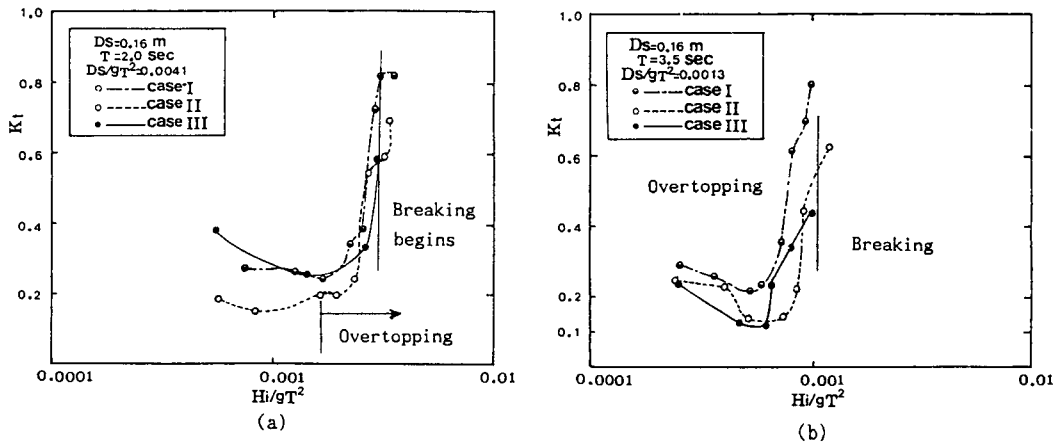


Fig. 7. Wave transmission through breakwater with tetrapod armor units. ($D_{aw}/A_c=0.68$).

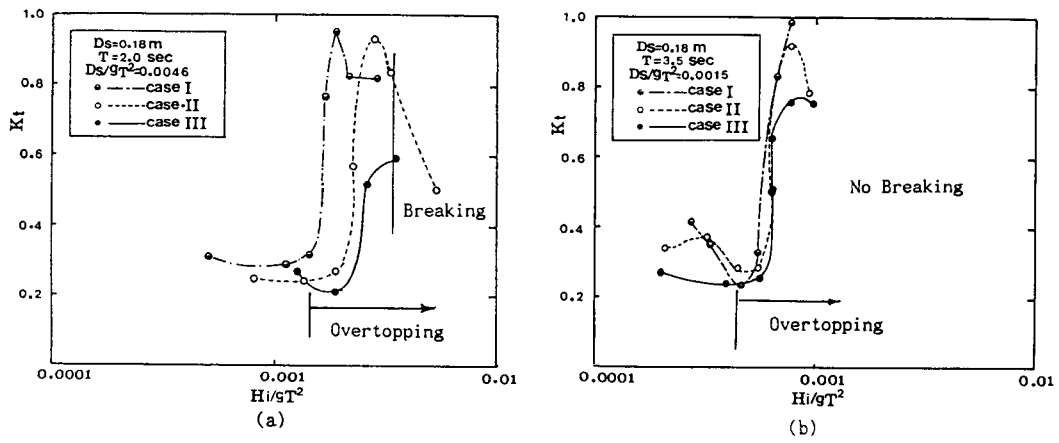


Fig. 8. Wave transmission through breakwater with tetrapod armor units. ($D_{aw}/A_c=0.68$).

로서 越波와 透過가 港內攪亂의 原因이 된다. Fig. 7에 보인 바와 같이 越波에 의해 傳達率이 상당히 增加하여 특히 碎波條件에 近接하면서 傳達率은 큰 增加를 보이는데 이는 주로 碎波量의 增加에 기인한다.

Fig. 7(a)에서는 비교적 작은 波高에서 Cap Concrete의 形狀效果는 불분명하다 높은 波高에서는 Case III의 傳達波高 減少效果가 두드러지고 있다. Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 長波($D_s/gT^2=0.0013$)의 경우 實驗波高의 全範圍에서 일반적으로 Case III, Case II, Case I 順으로 傳達率의 減少效果가 良好한 것으로 觀測되었다. Fig. 7에서 $H_i/gT^2=0.001$ 에서 Case III가 Case I에 비해 0.6배 정도의 港內傳達率을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Run Group III는 $D_{sm}=18\text{ cm}$ ($D_s/A_c=0.68$)인 경우로서 實驗條件은 Run Group II와 비슷하다. Fig. 8(a)에서 越波가 시작되면서 Case 別 傳達率 값이 큰 차이를 보이고 있으며 Case III의 傳達率 減少效果가 나타나고 있다. 특히 非碎波의 範圍에서도 Case III의 形狀效果가 현저히 나타나는 것은 前面水深比 D_s/A_c 가 클 경우는 透過되는 에너지의 일부도 Cap Concrete에 설치된 消散孔(hole)을 통하여 에너지를 喪失함을 알 수 있다.

5. 結 論

우리나라 東海岸에 建設되는 代表的인 透水性 防波堤 斷面에 대하여 構造物 上部에 設置되는 Cap Concrete의 形狀에 따른 港內波高傳達率에 대한 實驗的 研究가 수행되었다. 研究 結果, 上部構造物에 波浪에너지의 消散裝置를 設置한 Case III, Case II의 경우가 消散裝置가 없는 既存의 Case I보다도 港內波高傳達率의 減少效果를 가져오는 것으로 觀측되었다. 波高傳達率의 減少效果는 越波가 있는 경우, 그리고 長波일수록 현저하며, 防波堤의 天端高에 대한 全面水深의 比가 큰 경우에는 非越波의 경우도 Cap Conc-

rete의 形狀效果가 있는 것으로 나타났다. 波高傳達率의 減少效果는 Cap Concrete의 港側에 일정간격의 消散孔 및 apron을 설치한 Case III 構造가 가장 優秀하였으며, 既存의 Case I 構造의 경우에 대하여 $H_i/gT^2=0.0008\sim 0.0025$ 의 範圍에서 55~75%의 波高傳達率 값을 보여주었다.

東海岸에서의 深海設計波高 및 週期(수산청, 1989; 항만청, 1988)는 $H=6\sim 9\text{ m}$, $T=12\sim 15\text{ sec}$ 로서 經濟的 여건상 越波를 許容하지 않을 수 없는 형편이다. 따라서 本 研究의 結果 提示된 Case III와 같은 斷面構造를 實用化한다면 港內 靜穩도를 向上시킬 수 있을 것이다.

參考文獻

- Battjes, S.L., 1974. Method for estimating overtopping rates, Technical Report No. 17, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station.
- Diephuis, J.G.H.R., 1985. Scale effect involving the breaking of waves, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1: 194-201.
- Hamer, D.G., and Hamer, F.C., 1982. Laboratory experiments on wave transmission by overtopping, Coastal Eng., 6: 209-215.
- Goda, Y., 1969. Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Report of the Port and Harbor Research Institute, 8(3): 3-18.
- Goda, Y. and Abe, Y., 1968. Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Report of the Port and Harbor Research Institute, 7(3): 3-18.
- Johnson, J.W., Fuchs, R.A. and Morison, J.R., 1951. The damping action of submerged breakwater, Trans. A.G. U., 32(5): 704-718.
- Owen, M.W., 1983. Design of seawalls allowing for wave overtopping on gravel inlands, ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, WW4, 109: 429-444.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1977. Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, 3rd. ed., U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 水産廳, 1988. 海域別(東海, 南海) 深海波 推定報告書
- 海運港灣廳, 1988. 해운항만 設計波 推算 報告書