韓國海岸·海洋工學會誌
第4卷 第4號, pp. 243~249, 1992年 12月

混成防波堤의 無孔 및 有孔 케이슨의 水理特性에 관한 實驗

An Experimental Investigation for Hydraulic Characteristics of Solid and Perforated-wall Caissons of a Mixed Type Breakwater

徐慶德*·吳榮敏*·全仁植*·李達秀*
Kyung Duck Suh*, Young Min Oh*, In Sik Chun* and Dal Soo Lee*

要 旨 : 混成防波堤의 無孔 및 有孔 케이슨의 水理特性을 비교하기 위하여 波高 및 週期가 다른 여러 規則波를 대상으로 水理實驗을 실시하였다. 反射率, 傳達率, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등 수리특성 면에서 모두 유공케이슨이 무공케이슨보다 유리한 것으로 나타났으며, 본 실험 결과가 기존의 이론식 또는 경험식들과 대체로 잘 일치함을 보였다. 특히, 유공케이슨의 반사율은 遊水室 내에서의 共振現象과 밀접한 관계가 있어서 유수실의 폭이 유수실 내에서의 波長의 약 1/4 정도가 될 때 反射率이 最少가 됨을 알 수 있었다.

Abstract □ Hydraulic experiments were carried out to investigate the hydraulic characteristics of solid and perforated-wall caissons of a mixed type breakwater for regular waves of various heights and periods. It was found that a perforated-wall caisson is more advantageous than a solid caisson for such hydraulic characteristics as reflection, transmission, and runup at the front face of the caissons and that the experimental results agree reasonably well with existing theoretical or empirical relationships. Especially the reflection coefficient of a perforated-wall caisson, mainly governed by the resonance in the wave chamber, was found to be minimum when the width of the wave chamber is approximately a quarter of the wave length in the wave chamber.

1. 緖 論

최근 국제 교역량의 증가 및 전반적인 경제 발전에 따라 港灣의 신설 및 확장이 요구되고 있다. 항만 구조물중 가장 중요한 것은 防波堤로서 국내 주요 항만의 방파제 형태는 거의 모두가 混成防波堤이다. 또한 항만의 규모가 대형화됨에 따라 방파제가 수심이 깊은 곳까지 延長되어야 하는 경우 공사비 면에서 傾斜堤보다 유리한 混成堤의 건설은 더욱 증가하게 될 것이므로 이에 대한 연구가 필요할 것이다.

混成堤는 하부의 捨石基礎部(마운드)와 상부의 直立部로 구성된다. 직립부의 구조양식은 블록, 콘크리트 單塊 등이 사용되기도 하지만 공사비의 절감 및 공사기간의 단축을 위하여 Dry dock에서 제작하여 설치지점에 曳引한 후 속채움을 하여 가라앉히는 케이슨 工法이 많이 사용되고 있다. 혼성제는 직립부에서 강력한 波力에 저항하고 사석기초부는 직립부를 안전하게 지지하는 기초역할을 하는 구조형식이므로, 직립 케이슨의 수리특성 및 안정성에 관한 연구는 혼성제의 설계에 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

경사제에 비해 일반 혼성제의 단점 중의 하나는 직립부로부터의 파랑의 반사가 심해서 방파제의 港外側에 파고가 증가하여 선박의 航海나 錨泊 등에 지장을 초래할 수 있다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 직립부 전면에 有孔壁과 遊水室을 설치하여 파랑이 유공벽을 통하여 유수실 내로 진입할 때 渦流 등에 의해 발생하는 波浪에너지의 감쇠작용과 유수실 내에서의 共振現象을 이용하여 반사율을 감소시키는 유공케이슨이 사용되기도 한다. 또한 무공케이슨의 전면에 衝擊波壓이 발생할 경우 이를 완화시키기 위한 보완책으로서 유공케이슨이 사용되기도 한다(Takahashi, 1991).

*韓國海洋研究所 海洋工學研究室 (Ocean Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

본 연구에서는 혼성방파제의 무공 및 유공 케이슨에 대한 수리모형실험을 실시하여 반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등의 수리특성을 비교·검토한다.

2. 水理實驗

2.1 實驗裝置 및 觀測機器

실험에 사용된 水槽는 길이 53m, 높이 1.25m, 폭 1m의 크기로서, 수조의 상류쪽 13m와 하류쪽 7m 구간은 兩側壁이 鐵製로 되어 있으며 나머지 중앙부분 33m의 양측벽은 强化유리로 되어 있다. 조파기는 油壓式 피스톤型으로 최대 離隔距離가 ±50 cm이며 造波幾의 후면과 수조의 하류쪽 끝에는 傾斜式 消波裝置가 설치되어 있다. 이 수조는 波浪과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 複合水槽로서, 수조의 상·하류 및 중앙의 저면에 세 개의 흐름상자(Current box)가 설치되어 있고 이 흐름상자들은 수조의 하부에서 파이프와 펌프를 통하여 서로 연결되어 있는데 필요시 이 흐름상자들의 입구를 열고 펌프를 작동시킴으로써 수조내에 흐름을 발생시킬 수 있다. 본 실험에서는 펌프는 작동시키지 않은 상태에서 중앙 흐름상자의 입구는 닫고, 상·하류쪽 흐름상자의 입구를 약간만 열어놓은 상태에서 실험을 실시함으로써 방파제 전면과 후면 사이에 파이프를 통하여 미세한 흐름 발생을 허용하여 越波로 인한 방파제 전면과 후면 사이의 과도한 水位差의 발생을 방지할 수 있도록 하였다.

波浪의 반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등을 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 5개의(G1-G5) 波高計를 설치하였다. 사용된 파고계는 抵抗式이며 길이는 80 cm이다. 파고계 兩端의 非線形 구간을 제외하면 유효 측정범위는 파고계의 중앙으로부터 약 ±25 cm이다.

造波幾 制御와 관측자료의 취득을 위하여 32비트 IBM 386 PC를 사용하였다. 이 PC에는 4 채널의 D/A Converter와 16 채널의 A/D Converter가 내장되어 있으며, 이들은 각각 파고계 및 변위계로부터의 아나로그 出力을 디지탈 값으로 변환하여 기록하고, 컴퓨터에서의 디지탈 造波 시그날을 아나로그 형태로 변환하여 조파기에 보내기 위하여 사용되었다.

2.2 케이슨 模型의 製作

케이슨의 모형은 두께 10 mm 아크릴판으로 제작하였으며, 마운드와의 摩擦을 재현하기 위하여 저면에 콘크리트판을 부착하였다. 케이슨 본체와 콘크리트판 사이에는 두께 4 mm의 철판과 고무판을 삽입하였다. 철판은 수조 위 천정에 설치된 Hoist crane을 사용하여 케이슨을 들어서 옮길 때 케이슨의 무게를 지지하기 위한 것으로서 철판 양쪽에는 로프를 맬 수 있는 고리가 부착되어 있으며, 고무판은 철판과 콘크리트판 사이에서 마찰과 완충작용을 하기 위한 것이다. 철판과 아크릴 케이슨의 밑면은 직경 5 mm 볼트로 4지점에서 연결하였으며, 아크릴판, 철판, 고무판, 콘크리트판은 다시 직경 10 mm 볼트로 4지점에서 연결하여 상대적인 움직임이 거의 없도록 하였다.

케이슨은 수조의 좌우 측벽쪽에 들어가는 길이 각 30 cm인 두 개의 케이슨과 그 사이에 들어가는 길이 38.6 cm 한 개를 포함하여 총 3개로 분할 제작되었다. 케이슨과 방파제의 마운드 및 수심의 제원은 Fig. 2와 같다. 이 그림은 유공케이슨을 나타내고 있는데 有孔壁은 높이 12 cm, 폭 1.8 cm의 縱Slit로 되어 있고 Slit 사이의 部材幅은 교대로 3.2 및 2.6 cm로서 有孔率은 약 25%이다. 遊水室은 폭이 18 cm이며 상부가 열려 있는 형태이다. 한편, 무공케이슨은 유공케이슨

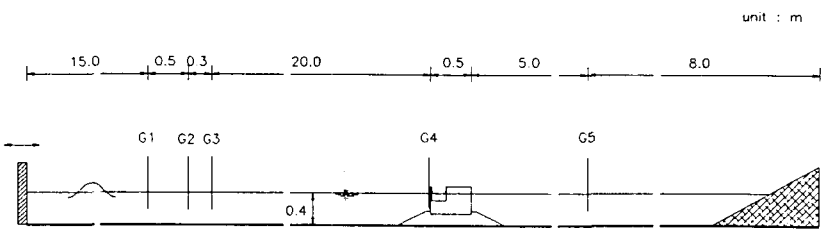

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

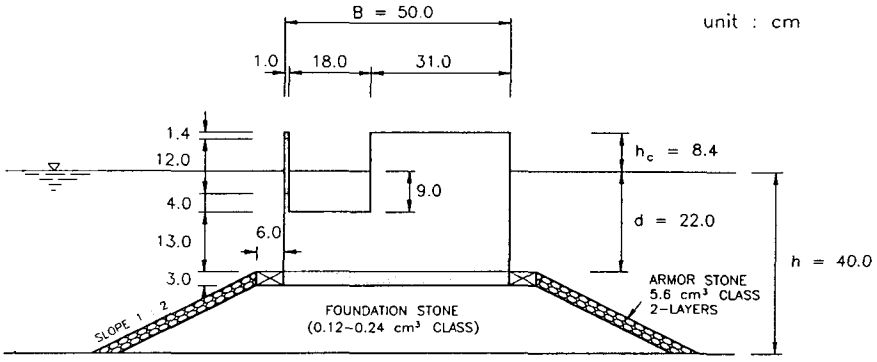

Fig. 2. Illustration of perforated-wall caisson breakwater.

의 유공벽을 무공벽으로 교체하고 유수실 상부를 아크릴판으로 밀폐하여 사용하였다.

마운드는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 우선 0.12-0.24 cm^3급 자갈을 전후 경사가 공히 1 : 2가 되도록 쌓은 후 경사면은 5.6 cm^3급 자갈 두겹으로 被服하였다. 케이슨의 전후에는 가로, 세로가 각각 6.0 cm, 높이가 3.6 cm인 根固블록을 한 열씩 배치하였다.

2.3 觀測 및 資料分析

방파제는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 造波幾로부터 약 35m 거리에 위치하도록 설치하였으며, 入射波와 反射波를 측정하기 위하여 방파제 前方에 3개의 파고계를(G1-G3), 傳達波를 측정하기 위하여 방파제 배후에 1개의 파고계를(G5), 그리고 방파제 전면벽에서의 쳐올림 높이를 측정하기 위하여 1개의 파고계를(G4) 설치하였다. 실험 파랑조건은 Table 1에 제시한 바와 같이 0.64 sec부터 1.8 sec까지의 10개 週期에 대하여 각 주기마다 2-5개의 波高가 다른 規則波를 설정하였다.

실험은 규칙파를 대상으로 실시하였기 때문에 방파제로부터 반사된 파가 造波板에서 再反射되어 다시 방파제 전방에 설치된 3개의 파고계를 통과할 때까지의 수면 변화를 관측하였다. 이와 같이 관측된 파랑자료 중 방파제 전방 3개의 파고계 설치 위치에서 입사파와 반사파가 공존하는 구간의 자료를 朴 等(1992)의 3점법에 의하여 분석하여 入·反射波를 분리하였다. 波浪資料는 20 Hz로 독취하였다.

방파제 배후에서의 傳達波는 주로 越波에 의해 발생되므로 규칙파인 경우에도 상당히 불규칙한 형태를 갖게 된다. 본 실험에서의 전달율은 방파제 배후에 설치한 파고계 기록으로부터 구한 最大波高의 入射波高에 대한 비로서 나타내었다.

케이슨 전면의 쳐올림 높이는 케이슨 전면벽에 설치한 파고계의 기록을 분석하여 靜水面으로부터의 波峰의 높이들을 평균하여 계산하였다.

3. 實驗 結果 및 分析

각 실험파랑의 제원 및 이들에 대한 반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등 水理特性 결과가 Table 1에 제시되어 있다. 본 실험결과와 다른 연구자들의 실험결과를 종합하여 波浪特性 및 防波堤 諸元 등의 변화에 따른 각 항목별 수리특성 분석결과를 아래에 제시한다.

3.1 反射率

혼성방파제 전면에서의 반사율은 天端高, 케이슨 前面의 形狀, 마운드의 높이 및 경사 등 방파제의 형상과 入射波浪의 특성에 따라 달라진다. 일반 海岸이나 傾斜堤에서와 같이 파랑이 傾斜面 위를 진행하는 경우 반사율은 주로 波形傾斜 및 경사면이 수평면과 이루는 각도에 의해 영향을 받는다(Battjes, 1974). 일반적으로 混成堤는 케이슨의 前面이 수직이고 마운드의 높이가 수심에 비해 비교적 작으며 淺海가 아닌 경우 波浪에너지가 수면에서 해저면으로 감에 따라 감소하므로 대부분의 에너지가 케이슨 前面에서 반사되며, 따라서 일반 혼성제의 반사율은 주로 波形傾斜에 의해 영향을 받게 될 것이다.

Table 1. Summary of experimental conditions and resulting hydraulic characteristics

Wave period (sec)	Wave height (cm)	Solid caisson			Perforated-wall caisson		
		Reflection coeff.	Transmission coeff.	Runup (cm)	Reflection coeff.	Transmission coeff.	Runup (cm)
1.8	15.0	0.78	0.223	28.8	0.57	0.090	25.2
	12.0	0.80	0.078	23.2	0.59	0.042	20.0
	9.0	0.80	0.032	18.0	0.54	0.034	15.2
	5.8	0.79		11.6	0.51		10.0
1.6	14.5	0.77	0.203	27.0	0.55	0.052	24.0
	11.5	0.84	0.069	22.4	0.56	0.032	20.0
	9.0	0.84	0.031	17.4	0.53	0.023	14.8
	6.5	0.81		12.6	0.50		10.5
	5.5	0.86		10.6	0.48		8.8
1.4	14.5	0.71	0.121	27.8	0.47	0.028	24.0
	11.5	0.78	0.061	22.0	0.48	0.025	18.8
	9.5	0.78	0.032	18.6	0.45	0.022	15.3
	7.5	0.79		14.8	0.44		12.0
	5.5	0.81		10.8	0.43		9.0
1.2	14.5	0.69	0.126	28.0	0.38	0.028	22.8
	12.0	0.72	0.060	24.0	0.43	0.020	20.0
	9.0	0.78	0.034	19.2	0.46	0.020	15.6
	6.2	0.81		12.6	0.40		10.0
1.0	12.2	0.53	0.082	22.8	0.38	0.011	18.4
	11.0	0.52	0.096	19.9	0.29	0.024	18.0
	9.5	0.56	0.045	20.1	0.35	0.020	16.5
	8.5	0.73	0.022	17.4	0.42	0.018	14.1
	5.5	0.79		11.8	0.35		10.6
0.92	6.2	0.91			0.39		
	4.6	0.89			0.36		
	3.2	0.92			0.36		
0.84	5.2	0.73			0.41		
	3.4	0.73			0.42		
	2.6	0.89			0.40		
0.78	4.2	0.92			0.47		
	3.4	0.85			0.46		
	2.6	0.85			0.46		
0.72	2.4	0.98			0.57		
	1.2	0.95			0.55		
0.64	2.2	0.97			0.65		
	1.2	0.88			0.70		

본 실험 및 Tanimoto *et al.*(1976)의 실험에서 무공 및 유공 케이슨에 대하여 관측된 반사율의 波形傾斜에 대한 변화를 Fig. 3에 圖示하였다. Tanimoto *et al.*의 실험에서 사용된 유공케이슨은 케이슨 前面 전체가 유수실로 되어 있고, 유공벽은 지름 2.5 cm의 원형 구멍들을 포함하는 多孔板으로 되어 있다. 有孔率은 약 24%로서 본 실험에서 사용된 縱Slit형 유공케이슨의 유공율 25%와 거의 같다. Tanimoto *et al.*의 실험은 불규칙파를 대상으로 실시되었기 때문에 有義波高와 有義波 波長을 이용하여 파형경사를 계산

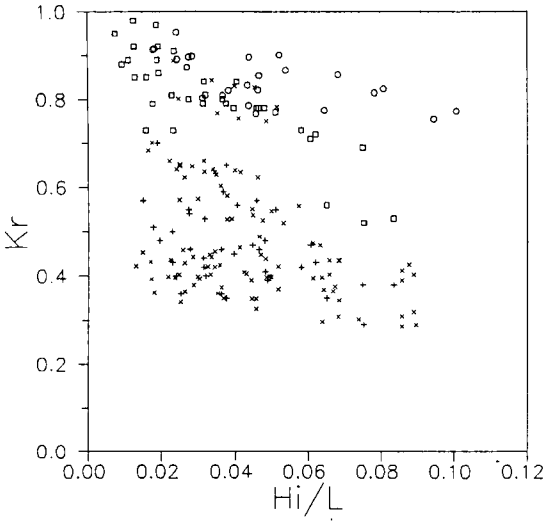

Fig. 3. Reflection coefficient vs wave steepness. □, solid caisson (present study); ○, solid caisson (Tanimoto *et al.* 1976); +, perforated-wall caisson (present study); ×, perforated-wall caisson (Tanimoto *et al.* 1976).

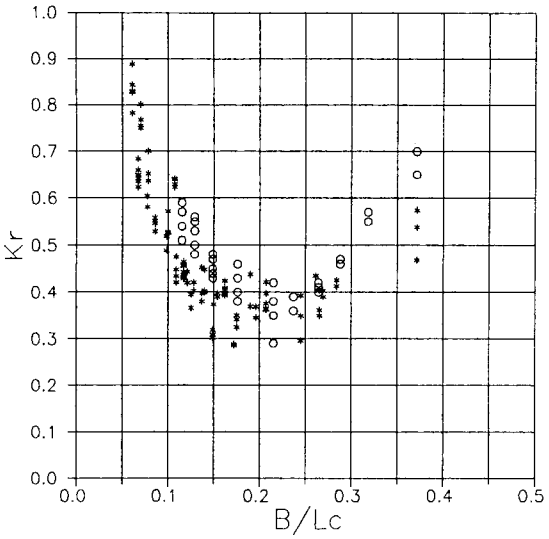

Fig. 4. Reflection coefficient vs nondimensionalized wave-chamber width for perforated-wall caissons. ○, present study; ∗, Tanimoto *et al.* (1976).

하였다. 전체적으로 유공케이슨의 반사율이 무공케이슨에 비해 훨씬 작으며 두 경우 모두 파형경사가 커짐에 따라 반사율이 감소함을 알 수 있다. 또한 동일한 파형경사에 대하여 반사율의 변화가 무공케이슨에 비해 유공케이슨의 경우가 더 심한 것을 알 수 있다. 특히 유공케이슨의 경우는 파형경사가 작고 越波가 심하지 않은 온화한 파랑조건에서 심한 반사율의 변화를 보이고 있어 파형경사 이외에 반사율을 지배하는 인자가 존재함을 추측할 수 있다.

최근에 Fugazza and Natale(1992)는 마운드가 없고 케이슨 前面 전체가 遊水室로 되어 있는 直立 有孔 케이슨의 경우 유수실의 폭이 파장의(2n+1)/4배 (n=0,1,2,…)가 될 때 유수실 내에서의 共振現象에 의해 반사율이 작아짐을 이론적으로 밝힌 바 있다. 이러한 현상은 潮汐波가 深海로부터 수심이 비교적 일정하고 육지쪽 끝이 막혀 있는 水路 안으로 전파될 때 발생하는 공진현상과 유사하다(Dean and Dalrymple, 1984). 현실적으로 유수실의 폭에 대한 제약을 감안할 때 실질적인 관심의 대상이 되는 경우는 유수실의 폭이 파장의 1/4배 (n=0)가 되는 경우일 것이다. 유공방파제가 마운드를 포함하고 있거나 또는 본 실험에서와 같이 케이슨 前面의 일부만이 유수실로 되어 있는 경우에는 방파제 前面에서의 파장이 유수실 내에서의 파장과 다르므로 이러한 경우에는 공진현상 해석에 유수실 내의 파장을 사용해야 한다.

본 실험 및 Tanimoto *et al.*(1976)의 실험 결과중 유공방파제에 대하여 반사율(K_r)과 유수실 폭(B)의 유수실 내에서의 파장(L_c)에 대한 비, B/L_c와의 관계를 Fig. 4에 圖示하였다. 規則波를 이용한 본 실험의 결과만을 보면 Fugazza and Natale(1992)의 이론과 잘 일치하여 $B/L_c=0.25$ 부근에서 반사율이 최소가 됨을 알 수 있다. 不規則波를 이용한 Tanimoto *et al.*(1976)의 실험 결과는 본 실험 결과보다 자료의 分散度가 좀 더 심하여 반사율이 최소가 되는 점을 판단하기가 어렵지만 전체적으로 볼 때 $B/L_c=0.2$ 부근에서 반사율이 작아짐을 알 수 있어서 규칙파에 대하여 제시된 Fugazza and Natale의 이론과 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

3.2 쳐올림 높이

여러 형태의 護岸에 대한 쳐올림 높이에 대한 Saville(1956)의 水理實驗 결과가 Shore Protection Manual(SPM, 1984)에 제시되어 있다. 직립 호안의 경우(SPM, Fig. 7-14), 非屈折 深海波高(H_o')에 대한 쳐올림 높이(R)의 비, R/H_o'을 波形傾斜를 나타내는 助變數, H_o'/gT^2 및 호안 전면에서의 水深(d_s)의 H_o'에 대한

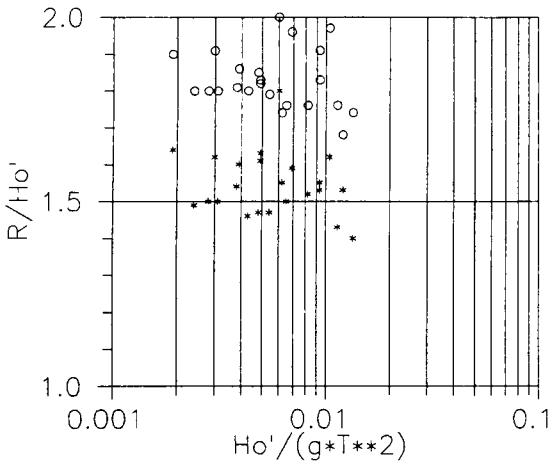

Fig. 5. Wave runup as a function of H_o'/gT^2. ○, solid caisson; ＊, perforated-wall caisson.

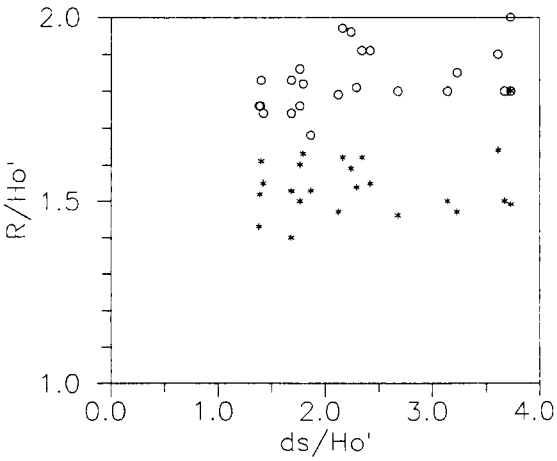

Fig. 6. Wave runup as a function of d_s/H_o'. ○, solid caisson; ＊, perforated-wall caisson.

비, d_s/H_o'의 변화와 비교한 결과, H_o'/gT^2가 증가함에 따라 R/H_o'이 감소하는 경향을 보이며 d_s/H_o'이 증가함에 따라 R/H_o'이 증가하는 경향을 보였다.

본 실험에서 관측된 無次元 쳐올림 높이, R/H_o'와 H_o'/gT^2 및 d_s/H_o'와의 관계가 Figs. 5 및 6에 제시되어 있다. 여기서 d_s는 마운드 상단에서의 수심으로 22 cm를 사용하였다. 자료의 分散度가 크기는 하지만 SPM에 제시된 결과와 비슷한 경향을 보이며, 유공케이슨의 경우 무공케이슨에 비해 쳐올림 높이가 작아서 유리함을 알 수 있다.

3.3 傳達率

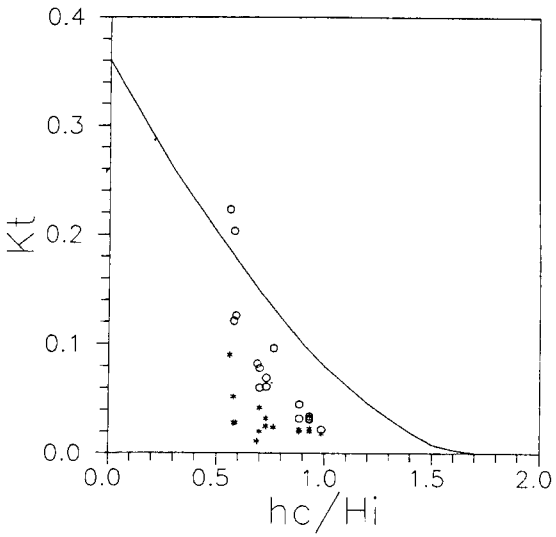

Fig. 7. Transmission coefficient vs nondimensionalized crest height. ○, solid caisson; ＊, perforated-wall caisson; −, Goda's (1969) design curve.

港內 靜穩度 측면에서 볼 때 항내의 수면교란은 港入口를 통한 外海 波浪의 침입 이외에 방파제에서의 波浪의 透過 및 越波에 의해서도 발생된다. 混成堤의 경우에는 마운드 및 케이슨 사이의 틈을 통하여 약간의 투과가 발생하지만 이보다는 월파에 의한 수면교란이 지배적이다. 월파에 의해 발생되는 傳達波는 규칙파인 경우에도 상당히 불규칙한 형태를 갖게 된다. 본 실험에서의 傳達率은 방파제 배후에 설치한 파고계 기록으로부터 구한 最大波高의 入射波高에 대한 비로서 나타내었으며, 파고가 작아 월파가 발생하지 않는 경우에는 관측되지 않았다.

혼성제의 여러 제원중 전달율을 지배하는 가장 중요한 요소는 天端高(h_c)이다. 入射波高(H_i)에 대하여 무차원화한 無次元 天端高, h_c/H_i의 변화에 따른 전달율의 변화를 Fig. 7에 圖示하였다. 그림중 實線은 케이슨의 폭이 수심과 거의 같은 경우의 直立堤에 대하여 Goda(1969)에 의해 제시된 전달율의 設計曲線을 나타낸다. 無孔 混成堤의 경우 전달율이 클 때는 대체로 Goda의 설계곡선에 접근하지만 전달율이 작은 경우에는 Goda 곡선보다 작아지는데, 이는 직립제와 혼성제의 차이에 의한 것일 수도 있으며 본 실험에 사용된 케이슨의 폭이 수심보다 약간 크기 때문에 파고가 작은 경우 월파된 파랑이 케이슨 상부에 떨어져서 전달파가 작아지는 현상에 기인할 수도 있을

것이다. 유공케이슨의 전달율은 무공케이슨에 비해 훨씬 작아 전달율 면에서도 유공케이슨이 무공케이슨보다 유리함을 알 수 있다.

4. 結 論

無孔 및 有孔 케이슨의 水理特性을 비교하기 위하여 파고 및 주기가 다른 여러 규칙파를 대상으로 수리모형실험을 실시하였으며, 가능한 부분에서는 다른 연구자들의 실험 결과 또는 이론 및 경험식들과 비교, 검토하였다.

반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등 水理特性 면에서 모두 유공케이슨이 무공케이슨보다 유리한 것으로 나타났으며, 본 실험 결과가 기존의 이론식 또는 경험식들과 대체로 잘 일치함을 보였다. 특히 유공케이슨의 반사율은 遊水室 내에서의 共振現象과 밀접한 관계가 있어서 유수실의 폭이 유수실 내에서의 波長의 약 1/4 정도가 될 때 반사율이 최소가 됨을 알 수 있었다.

謝 辭

본 논문은 韓國海洋研究所에서 시행한 基本研究事業, "混成防波堤의 케이슨에 작용하는 波壓分布 特性(I)"의 결과중 일부를 補完 整理한 것입니다.

參考文獻

朴佑善, 吳榮敏, 全仁植, 1992, 最小自乘法에 의한 入·反射波의 分離技法, 韓國海岸·海洋工學會誌, 제 4권, 제 3호, pp 139-145.

Battjes, J.A., 1974, Surf similarity, *Proc. 14th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 466-480.

Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1984, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Fugazza, M. and Natale, L., 1992, Hydraulic design of perforated breakwaters, *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, **118**(1), 1-14.

Goda, Y., 1969, Reanalysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, *Rep. of Port and Harbour Res. Inst.*, Ministry of Transport, Japan, Vol. 18, No. 3.

Saville, T., 1956, Wave runup on shore structures, *J. Wtrwys. and Harbors Div.*, ASCE, WW2(82).

Shore Protection Manual, 1984, U.S. Army Coast. Engrg. Res. Center, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Takahashi, S., 1991, Impulsive wave pressure on caisson breakwaters, Personal Memo, Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.

Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M., 1976, An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls, *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, Ministry of Transport, Japan, No. 246 (in Japanese).