

BSPE 00276-458-2

混成防波堤의 케이슨에 작용하는 波壓分布 特性(I)

Characteristics of Wave Pressure Distribution Acting on
the Caisson of Mixed Type Breakwaters(I)

1992. 6.

韓國海洋研究所

提出文

韓國海洋研究所長 貴下

本 報告書를 “混成防波堤의 케이스에 작용하는 波壓分布 特性(I)” 課題의
最終報告書로 提出합니다.

1992년 6월

韓國海洋研究所

研究責任者: 徐慶德

研究員: 宋源吾 研究員: 李達秀

研究員: 徐承男 研究員: 全仁植

研究員: 朴佑善 研究員: 吳榮敏

要約文

I. 題目

混成防波堤의 케이슨에 작용하는 波壓分布 特性(I)

II. 研究開發의 重要性 및 目的

1. 최근 국제 교역량의 증가 및 전반적인 경제 발전에 따라 항만의 신설 및 확장이 요구되고 있다. 항만 구조물중 가장 중요한 것은 방파제로서 국내 주요 항만의 방파제 형태는 모두가 混成防波堤이다. 또한 항만의 규모가 대형화됨에 따라 방파제가 수심이 깊은 곳까지 연장되어야 하는 경우 공사비 면에서 경사제보다 훨씬 유리한 혼성제의 건설이 증가할 것이므로 이에 대한 연구가 더욱 필요하게 될 것이다.
2. 혼성제는 하부의 捨石基礎部(마운드)와 상부의 直立部로 구성된다. 직립부의 구조양식은 케이슨, 블록, 셀룰러 블록, 콘크리트 단괴 등이 있는데 본 연구에서는 국내 혼성제에 많이 사용되고 있는 케이슨식 混成堤를 대상으로 한다. 혼성제는 直立部에서 강력한 波力에 저항하고 기초사석부는 직립부를 안전하게 지지하는 기초역할을 하는 구조형식이므로, 직립 케이슨에 작용하는 파압분포에 관한 연구는 혼성제의 설계에 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

3. 경사제에 비해 일반 혼성제의 단점중의 하나는 직립 케이슨으로부터의 파랑의 반사가 심해서 방파제의 港外側에 파고가 증가하여 선박의 항해나 묘박 등에 지장을 초래할 수 있다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 직립부에 有孔壁과 遊水室을 설치하여 파랑이 유공벽을 통하여 유수실 내로 진입할 때 渦流 등에 의해 발생하는 파랑에너지의 減衰作用과 유수실 내에서의 共振現象을 이용하여 반사율을 감소시키는 유공케이슨이 사용되기도 한다.
4. 본 연구의 목표는 혼성방파제의 무공 및 유공 케이슨에 작용하는 파압분포에 대한 기존의 연구결과를 조사, 분석, 정리하고 실제로 이들에 대한 水理模型實驗을 실시하여 판측된 결과를 기존의 연구결과와 비교, 분석함으로써 케이슨에 작용하는 파압은 물론 기타 수리현상의 특성을 파악하는 데 있다.

III. 研究開發의 內容 및 結果

1. 혼성방파제의 케이슨에 작용하는 파압을 계산하기 위하여 사용되어 왔던 기존의 파압계산 공식들을 정리하였다.
2. 혼성방파제 케이슨의 安定 및 部材設計에 중요한 衝擊波의 발생 메카니즘과 그 특성 및 해석방법에 관한 연구결과를 요약, 정리하였다.
3. 무공 및 유공 케이슨을 포함하는 혼성방파제에 대한 수리모형실험을 실시하여 케이슨의 각 부분에 작용하는 파압과 反射率, 傳達率, 케이슨 전면에서의 처올림 높이 등의 수리특성을 판측함으로써 기존의 연구결과 또는 有·無孔케이슨 간에 비교를 실시하였다.

4. 유·무공케이스 간의 水理特性 비교결과, 유공케이스가 무공케이스보다 실험대상과랑 전체에서 반사율, 전달율, 쳐올림 높이가 모두 작았으며 파압특성 비교결과, 케이스 전면에서의 파압은 유공케이스가 훨씬 작아서 전반적으로 有孔케이스가 無孔케이스에 비해 유리한 것으로 판명되었다.

Summary

I. Title

Characteristics of Wave Pressure Distribution Acting on the Caisson of Mixed Type Breakwaters(I)

II. Significance and objectives of the study

1. Recent increase of overseas trade and overall economic development require construction and extension of harbors. The most important structure of a harbor is a breakwater, and most of the breakwaters of the important harbors in Korea are mixed type ones. As the size of a harbor becomes large, the breakwater should be extended to deeper water. In this case the construction of a mixed type breakwater costs less compared to a rubble mound breakwater. More studies of a mixed type breakwater are thus necessary.
2. A mixed type breakwater consists of the lower rubble foundation and the upper upright section. The structure of the upright section can be a caisson, blocks, cellular blocks, or a concrete box filled with poured concrete. In this study we deal with only a caisson structure. Since the caisson of a mixed type breakwater should resist against the major part of the wave force and the rubble foundation serves only as the foundation supporting the caisson, the study of

the wave pressure acting on the caisson will be most important in the design of mixed type breakwaters.

3. One of the drawbacks of a mixed type breakwater compared to a rubble mound breakwater is that the increased agitation on the sea side of the breakwater due to severe reflection from the caisson can make difficulties on navigation or anchoring of ships. In order to overcome this drawback a perforated-wall caisson is often used, which reduces the reflection by dissipating the wave energy due to turbulence generated when the waves enter the wave chamber through the perforated wall and by the resonance occurring in the wave chamber.
4. The objectives of the present study are to summarize the state-of-the-art research on wave pressure acting on the caisson of a mixed type breakwater and to make comprehensive analyses on wave pressure and other hydraulic characteristics by carrying out hydraulic model tests on solid-wall and perforated-wall caissons of a mixed type breakwater.

III. Contents and results of the study

1. The existing formulas for estimating wave pressure acting on the caisson of a mixed type breakwater are summarized.
2. The state-of-the-art research (including generation mechanism, hydraulic characteristics, and analysis) on impact breaking wave force is summarized, which is important for design of the member as well as stability of a caisson.

3. Hydraulic model tests on solid-wall and perforated-wall caissons of a mixed type breakwater are made to measure the wave pressure acting on the caissons and the hydraulic characteristics such as reflection, transmission, and wave runup on the front face of the caissons. The measured results are compared each other and also with the results of other researchers.
4. The comparison of hydraulic characteristics such as reflection, transmission, and runup of waves shows that the perforated-wall caisson is advantageous compared to the solid-wall caisson for all the wave conditions to be tested. This is also true for wave pressure.

目 次

圖目次.....	13
表目次.....	15
寫眞目次.....	17
제 1 장 서론.....	19
제 2 장 混成防波堤의 直立部에 작용하는 波壓계산 공식.....	21
제 1 절 Sainflou 공식.....	22
제 2 절 Hiroi 공식.....	23
제 3 절 Goda 공식.....	24
3.1 설계파의 파고 및 주기.....	26
3.2 前面波壓.....	26
3.3 揚壓力.....	27
3.4 유공방파제에 대한 Goda 공식.....	28
제 3 장 케이슨에 작용하는 衝擊波의 특성.....	37
제 1 절 충격파의 발생조건.....	38
제 2 절 충격파의 특성과 해석.....	39
2.1 충격파의 특성.....	39
2.2 충격파의 해석.....	44
제 4 장 水理模型實驗.....	49
제 1 절 실험장치 및 관측기기.....	49

1.1 조파수조.....	49
1.2 파고계.....	51
1.3 파압계.....	51
제 2 절 케이스 모형의 제작.....	51
제 3 절 관측 및 자료분석.....	53
제 5 장 실험결과 및 분석	57
제 1 절 케이스의 水理特性.....	57
1.1 反射率.....	57
1.2 傳達率.....	60
1.3 처울림 높이.....	60
제 2 절 波壓特性.....	60
2.1 파압분포.....	61
2.2 유공케이스에 작용하는 파압분포의 시간적 변화.....	78
제 6 장 결론 및 차후 연구계획.....	91
제 1 절 결론.....	91
제 2 절 차후 연구계획.....	92
참고문헌.....	95

圖 目 次

(List of Figures)

Fig. 2.1	Sainflou's pressure diagram when crest or trough of a standing wave locates at the front face of a vertical wall	23
Fig. 2.2	Hiroi's diagram of wave pressure acting on a vertical wall	24
Fig. 2.3	Goda's diagram of wave pressure acting on a caisson of a mixed type breakwater (after Goda 1985)	25
Fig. 2.4	Goda's modified diagram of wave pressure acting on a perforated-wall caisson (after Takahashi 1991)	29
Fig. 2.5	Different phases of a wave impinging upon a perforated-wall caisson(after Takahashi 1991)	30
Fig. 2.6	Profiles of wave forces acting on a perforated-wall caisson. The arrows indicate the different phases explained in Fig. 2.5 (after Takahashi 1991)	31
Fig. 2.7	Distribution of wave pressure on each part of a perforated-wall caisson at the phase Crest IIa (after Takahashi 1991)	33
Fig. 2.8	Distribution of wave pressure on each part of a perforated-wall caisson at the phase Trough I (after Takahashi 1991)	33
Fig. 3.1	Transition of wave force on a caisson from standing wave to impact breaking wave	37
Fig. 3.2	Example of wave force variation due to mound configuration (after Tanimoto et al. 1981)	39
Fig. 3.3	Illustration of various kinds of impact breaking wave force (after Jensen 1984)	40
Fig. 3.4	Example of ventilated shock pressure observed in the hydraulic model test of Pusan artificial island breakwater	41

Fig. 3.5	Example of Bagnold-type impact wave pressure observed in the hydraulic model test of Pusan artificial island breakwater	43
Fig. 3.6	Schematic diagram of Bagnold-type impact wave pressure (after Takahashi et al. 1983)	44
Fig. 3.7	Adjustment factor of peak pressure (after Takahashi et al. 1985 and 부산직할시 1992).....	46
Fig. 4.1	Two dimensional wave-current generation flume.....	50
Fig. 4.2	Specification of the perforated-wall caisson breakwater.....	52
Fig. 4.3	Location of breakwater and wave gauges.....	53
Fig. 4.4	Location of pressure gauges for the solid-wall caisson.....	55
Fig. 4.5	Location of pressure gauges for the perforated-wall caisson.....	55
Fig. 5.1	Reflection coefficient versus wave steepness for solid-wall and perforated-wall caissons.....	59
Fig. 5.2	Reflection coefficient versus one-dimensionalized wave chamber width for perforated-wall caisson.....	59
Fig. 5.3	Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.0s$ (thick line : Goda, thin line : solid-wall, dashed line : perforated-wall).....	63
Fig. 5.4	Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.2s$ (thick line : Goda, thin line : solid-wall, dashed line : perforated-wall).....	66
Fig. 5.5	Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.4s$ (thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall).....	68
Fig. 5.6	Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.6s$ (thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall).....	71
Fig. 5.7	Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.8s$ (thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall).....	74
Fig. 5.8	Example of shock pressure ($T=1.0s$, $H=12.2cm$).....	77
Fig. 5.9	Distribution of wave pressure on the perforated-wall caisson ($T=1.0s$, $H=5.5cm$).....	80
Fig. 5.10	Distribution of wave pressure on the perforated-wall caisson ($T=1.8s$, $H=15.0cm$).....	82

表 目 次
(List of Tables)

Table 2.1 Modification factor for wave pressure acting on a perforated-wall caisson.....	34
Table 5.1 Hydraulic characteristics(reflection, transmission, runup) of caisson.....	58
Table 5.2 Characteristics of wave pressure acting on the solid-wall caisson.....	61
Table 5.3 Characteristics of wave pressure acting on the perforated-wall caisson.....	62
Table 5.4 Characteristics of wave pressure acting on the perforated-wall caisson for different phases.....	79

寫真目次
(List of Photos)

Photo 5.1 Wave patterns on a perforated-wall caisson for different phases
($T = 1.8\text{sec}$, $H = 15.0\text{cm}$)..... 85

제1 장 서론

최근 국제 교역량의 증가 및 전반적인 경제 발전에 따라 항만의 신설 및 확장이 요구되고 있다. 항만 구조물중 가장 중요한 것은 방파제로서 국내 주요 항만의 방파제 형태는 모두가 混成防波堤이다. 또한 항만의 규모가 대형화됨에 따라 방파제가 수심이 깊은 곳까지 연장되어야 하는 경우 공사비 면에서 傾斜堤보다 훨씬 유리한 混成堤의 건설이 증가할 것이므로 이에 대한 연구가 더욱 필요하게 될 것이다.

混成堤는 하부의 捨石基礎部(마운드)와 상부의 直立部로 구성된다. 직립부의 구조양식은 케이슨, 블록, 셀룰러 블록, 콘크리트 단괴 등이 있는데 본 연구에서는 국내 혼성제에 많이 사용되고 있는 케이슨식 혼성제를 대상으로 한다. 混成堤는 직립부에서 강력한 파력에 저항하고 기초사석부는 직립부를 안전하게 지지하는 기초역할을 하는 구조형식이므로, 직립 케이슨에 작용하는 파압분포에 관한 연구는 混成堤의 설계에 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

경사제에 비해 일반 혼성제의 단점중의 하나는 직립 케이슨으로부터의 파랑의 반사가 심해서 방파제의 항외측에 파고가 증가하여 선박의 航海나 擱泊 등에 지장을 초래할 수 있다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 직립부에 유공벽과 遊水室을 설치하여 파랑이 유공벽을 통하여 유수실 내로 진입할 때 와류 등에 의해 발생하는 파랑에너지의 감쇄작용과 유수실 내에서의 共振現象을 이용하여 반사율을 감소시키는 유공케이슨이 사용되기도 한다.

본 연구의 목표는 혼성방파제의 무공 및 유공 케이슨에 작용하는 파압분포에 대한 기존의 연구결과를 조사, 분석, 정리하고 실제로 이들에 대한 水理模型實驗을

실시하여 관측된 결과를 기존의 연구결과와 비교, 분석함으로써 케이슨에 작용하는 파압은 물론 기타 수리현상의 특성을 파악하는 데 있다.

본 보고서의 내용은 다음과 같다. 제 2 장에는 混成防波堤의 케이슨에 작용하는 파압을 계산하기 위하여 사용되어 왔던 기존의 파압계산 공식들이 정리되어 있다. 제 3 장에서는 혼성방파제 케이슨의 안정 및 部材設計에 중요한 충격파의 발생 메카니즘과 그 특성 및 해석방법에 관한 연구결과를 요약, 정리하였다. 제 4 장 및 5 장에서는 무공 및 유공 케이슨을 포함하는 혼성방파제에 대한 水理模型實驗을 실시하여 케이슨의 각 부분에 작용하는 파압과 반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등의 水理特性을 관측함으로써 기존의 연구결과 또는 有·無孔 케이슨 간에 비교를 실시하였다. 제 6 장에는 결론 및 후속 연구계획에 대한 내용이 수록되어 있다.

제 2 장 混成堤의 케이스에 작용하는 파압계산 공식

외해로부터 전파되어온 파랑이 방파제에 도달하게 되면, 입사파의 특성, 방파제의 형상, 수심 및 해저면 경사 등에 따라 堤體 前面에 중복파 또는 碎波의 형태로 파압이 작용하게 된다. 일반적으로 重複波에 의한 파압은 시간적으로 완만한 변화를 보이며 直立部 전면에 중복파의 波峰이 위치하게 되는 시간에 케이스 전면에는 최대파압을 발생시킨다. 쇄파에 의한 파압은 정도의 차이가 있기는 하지만 일반적으로 충격파압의 형태로 발생하며 직립부 전면의 위치에 따라 시차를 가지고 최대파압이 발생하게 된다. 衝擊波의 특성은 파압이 거의 작용하지 않던 상태에서 순간적으로 큰 파압이 작용하고 다시 빠른 속도로 파압이 감소하는 것이다.

일반적으로 직립벽 전면의 水深이 波高의 2 배 이상인 경우는 중복파가 작용하고, 수심이 파고의 2 배 이하인 경우는 쇄파가 작용한다고 하여 파압을 계산하게 된다. 그러나 혼성제인 경우는 방파제 전면의 수심과 직립부 전면의 수심이 다르므로 이 경우는 다음과 같이 구별한다. 방파제 전면의 수심을 h , 직립부 전면의 마운드에서의 수심을 d , 그리고 入射波高를 H 라고 할 때 $d/H > 2$ 의 경우는 중복파, $d/H < 1.5 - 2.0$ 의 경우는 碎波가 발생한다고 생각한다. 즉, 마운드의 높이가 증가하여 직립부 전면의 수심이 낮아지게 되면 쇄파가 발생하게 된다. 직립부 전면의 수심이 한계치보다 크더라도 방파제 전면의 海底傾斜가 심하거나 직립부 전면 마운드 Berm의 폭이 넓은 경우 쇄파 발생의 원인이 되기도 한다.

본 장에서는 최근까지 混成堤의 直立部에 작용하는 파압을 계산하기 위하여 널리 쓰여왔던 공식들과 현재 거의 모든 혼성제 설계에 범용적으로 사용되고 있는 Goda

공식을 요약하여 정리한다. 이 중 Sainflou 公式은 중복파가 작용하는 경우, Hiroi 공식은 쇄파가 작용할 경우에 사용되며, Goda 공식은 파랑의 쇄파 여부에 관계없이 사용된다. 이 외에도 Minikin 공식, Nagai 공식 등이 있는데 Minikin 공식은 설계파압을 과대추정하게 되며 Nagai 공식은 공식의 적용범위의 경계치가 無次元量으로 표시되어 있지 않고 적용범위의 구별이 복잡하여 실제 방파제 설계에 거의 이용되지 않고 있다.

제 1 절 Sainflou 공식

波形傾斜가 작은 경우 중복파에 의한 파압은 微小振幅波理論을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 설계파와 같이 파형경사가 큰 경우에는 파랑을 有限振幅波로 가정하고 Trochoid波 理論에 의해 구한 Sainflou 공식이 (Quinn(1961) 참조) 사용된다. 이 식에서는 우선 파고의 中分面과 정수면과의 차 d_o 를

$$d_o = \frac{kH^2}{2} \coth kh \quad (2.1)$$

로 계산한다. 여기서 k 는 波數를 나타낸다. 중복파의 波峰과 波谷이 케이슨 전면에 위치할 때의 파압분포가 Fig. 2.1에 주어져 있다. 이 그림에서

$$p_1 = (p_2 + w_o h) \left(\frac{H + d_o}{h + H + d_o} \right) \quad (2.2)$$

$$p_1' = w_o(H - d_o) \quad (2.3)$$

$$p_2 = p_2' = \frac{w_o H}{\cosh kh} \quad (2.4)$$

로 주어지며, w_o 는 海水의 單位重量을 나타낸다. 이 그림에서 해수면 근처의 최대파압으로부터 해저면까지의 파압은 원래 指數函數的으로 減衰하는 모양을 갖지만 계산의 간략화와 안전설계를 위하여 이 구간을 직선으로 연결한 것이다.

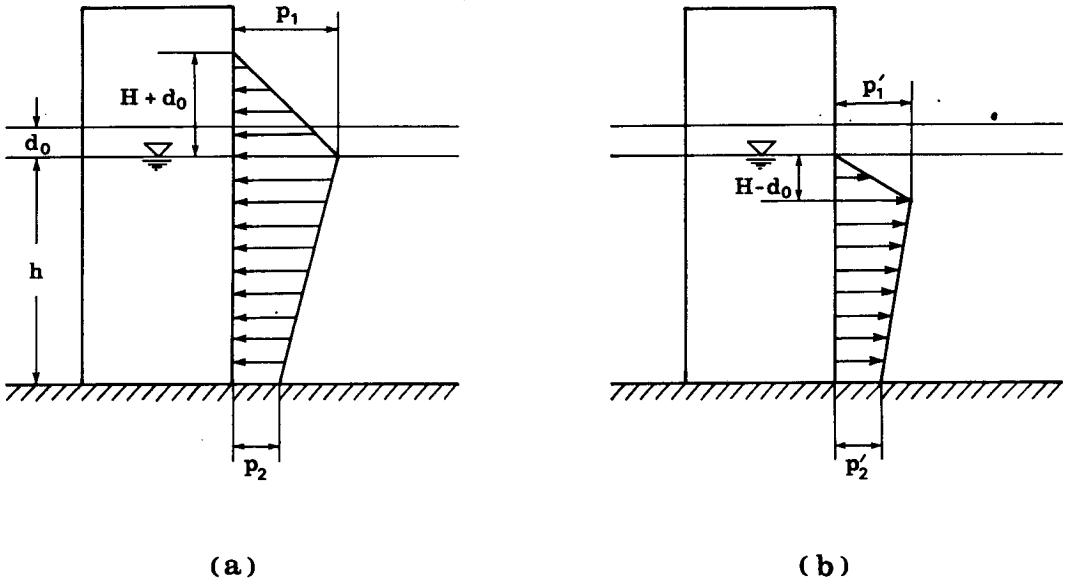


Fig. 2.1 Sainflou's pressure diagram when crest or trough of a standing wave locates at the front face of a vertical wall

제 2 절 Hiroi 公式

쇄파에 의한 파압을 계산하기 위하여 1960년대까지 많이 사용되었던 공식은 Hiroi 공식이다. 일반적으로 碎波는 매우 짧은 시간(0.1초 이하)내에 충격적인 파압을 작용시킨다. Hiroi(1919)는 쇄파에 의한 파압이 제트(Water jet)에 의한 압력과 유사하다고 생각하여 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$p = 1.5w_0H \quad (2.5)$$

이 파압은 Fig. 2.2에 제시된 바와 같이 天端이 낮은 경우에는 케이스 전면 전체에, 천단이 높은 경우에는 정수면으로부터 $1.25H$ 높이까지 균일하게 작용한다고 가정된다. 여기서

설계파고 H 는 보통 케이스 설치위치에서의 입사파의 有義波高로 취해지며, 신빙성 있는 설계파 조건이 주어지지 않는 경우에는 통상 수심의 0.9 배를 설계파고로 취한다. 이 공식에 의한 쇄파압은 실험실이나 현장에서 관측된 局部的인 波壓強度와는 어느 정도 차이를 보이지만, 작용면적에 대한 파압의 평균치와는 잘 맞는다고 인정되고 있다.

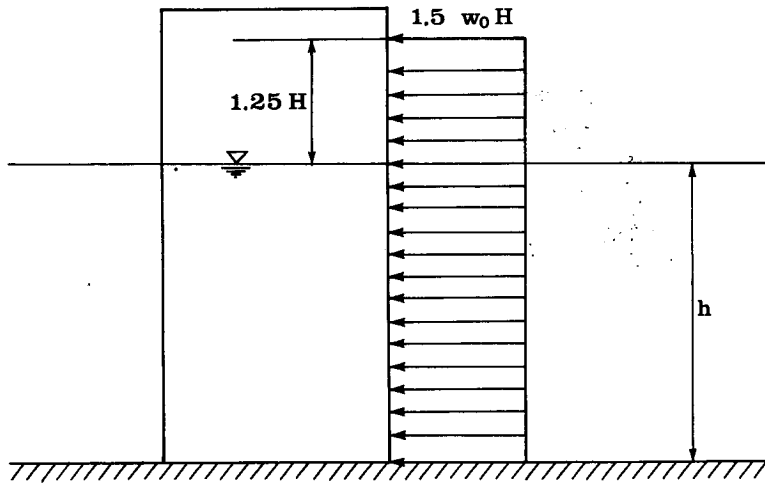


Fig. 2.2 Hiroi's diagram of wave pressure acting on a vertical wall

제 3 절 Goda 공식

방파제는 일반적으로 육지로부터 수심이 깊은 지역까지 연결하여 건설된다. 이 경우 위치에 따라 수심과 설계파가 달라질 수 있으며, 이에 따라 중복파압 또는 쇄파압 공식을 별도로 적용하여 설계파압을 계산하여 왔다. 그러나 중복파와 쇄파의 경계가 되는 지점에서는 이러한 두 개의 파압공식이 서로 큰 차이를 보일 수도 있으며, 또한 설계파의 조건이 약간 달라지면 이 파압공식들의 적용구간이 달라져서 다른 파압공식을 적용하여

이 그림에서 h 와 d 는 앞에서 정의된 바와 같이 각각 방파제 전면에서의 수심, 케이슨 전면 마운드 상에서의 수심을 나타내며, h' 은 정수면으로부터 케이슨 밀면까지의 수심, h_c 는 방파제의 천단고를 나타내고, η^* 는

$$\eta^* = 0.75 (1 + \cos \beta) H_{\max} \quad (2.6)$$

의 식으로 표시되어 파압이 영이 되는 높이를 나타낸다. 이 식에서 β 는 방파제의 법선 방향으로부터의 파랑의 입사각을 나타내며 실제 파랑의 주방향으로부터 방파제의 법선 쪽으로 15° 만큼 회전시킨 값을 사용한다. 이와 같이 입사각을 작게 조정하여 사용하는 이유는 입사각을 추정하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 감안하여 안전설계를 하려는 데 있다. 아래에 주어지는 식들에서도 입사각은 이와 같이 조정된 값을 사용한다.

3.1 설계파의 파고 및 주기

파고는 방파제가 碎波帶 밖에 위치하는 경우에는 방파제 위치에서의 최대파고 $H_{\max} = 1.8 H_{1/3}$ 을 사용하며, 碎波帶 안에 위치하는 경우에는 방파제 전면 $5 H_{1/3}$ 거리에서의 최대파고를 사용한다. 주기는 파고의 대표치에 따라 별로 변화가 없으므로 유의파주기 $T_{1/3}$ 을 그대로 사용한다.

3.2 前面波壓

케이슨 전면의 파압은 Fig. 2.3에 주어진 바와 같이 정수면에서 최대파압을 나타내고 이로부터 상하로 직선적으로 감소하는 사다리꼴 분포를 나타낸다. 각 부분의 파압은 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta) w_o H_{\max} \quad (2.7)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh kh} \quad (2.8)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (2.9)$$

여기서

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (2.11)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh kh} \right) \quad (2.12)$$

로 주어지며, h_b 는 방파제의 항외측 $5 H_{1/3}$ 거리에서의 수심을 나타낸다.

3.3 揚壓力

케이슨의 저면에 작용하는 양압력은 Fig 2.3에 표시된 대로 케이슨의 앞끝에서

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 w_o H_{\max} \quad (2.13)$$

의 값을 갖고 케이슨의 뒤끝에서의 영까지 직선적으로 변하는 삼각형 분포를 나타낸다.

이론적으로는 케이슨 저면 앞끝에서의 양압력, p_u 가 케이슨 전면 하단에서의 파압, p_3 와 같은 값을 나타내야 하겠지만, 실제로는 p_u 가 p_3 보다 약간 작은 값을 갖는 것으로 판명되었다. 한편, 양압력은 越波에 의해 크게 영향을 받지 않지만, 실험자료에 의하면 케이슨의 天端高가 아주 낮은 경우에는 다소 감소하는 경향을 보인다.

3.4 유공방파제에 대한 Goda 공식

앞에 소개한 Goda 공식은 케이슨의 전면이 직립벽으로 되어있는 전형적인 혼성제에 대하여 사용할 수 있도록 제안된 공식이다. 사석제에 비하여 혼성제의 단점 중의 하나는 직립 케이슨으로부터의 파랑의 반사가 심하여 방파제의 항외측에 파고가 증가하여 선박의 항해나 묘박 등에 지장을 줄 수 있다는 것이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 케이슨 전면에 유공벽과 유수실을 설치하여 파랑이 유공벽을 통하여 유수실 내로 진입할 때 외류 등에 의해 발생하는 파랑 에너지의 減衰作用과 유수실 내에서의 共振現象을 이용하여 反射率을 감소시키는 유공방파제가 사용되기도 한다. 유공방파제는 Jarlan(1961)에 의해 최초로 제안되어 현재 일본, 이탈리아 등지에서 주요 항만의 외곽방파제는 물론 부두, 또는 호안 구조물로 널리 사용되고 있다.

일반적으로 유공방파제는 무공제보다 작은 파력을 받는다. Fig. 2.4에 나타난 바와 같이 케이슨 전면 전체가 遊水室로 되어 있는 유공케이슨에 작용하는 파압분포는 식 (2.6)부터 (2.13)까지로 주어진 무공케이슨에 대한 공식중 일부를 다음과 같이 수정하여 계산한다.

$$\eta^* = 0.75 (1 + \cos\beta) \lambda_1 H_{\max} \quad (2.14)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2\beta) \lambda_1 w_o H_{\max} \quad (2.15)$$

$$p_u = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 w_o H_{\max} \quad (2.16)$$

여기서 파압보정계수 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 등은 유공벽과 유수실의 형상 및 크기 등에 따라 달라지는 값들로서 수리모형실험 등을 통하여 결정되어야 한다. 유수실 아래의 케이슨 저면에 작용하는 양압력은 유수실 저면에 연직방향으로 작용하는 파압과 상쇄되므로 케이슨 저면의 양압력은 유수실을 제외한 부분에만 작용하는 것으로 계산한다. 또한

유수실 후벽에 최대파압이 작용하는 순간 유공벽 전면과 후면에 작용하는 파압은 서로 상쇄되므로 계산에 고려하지 않는다.

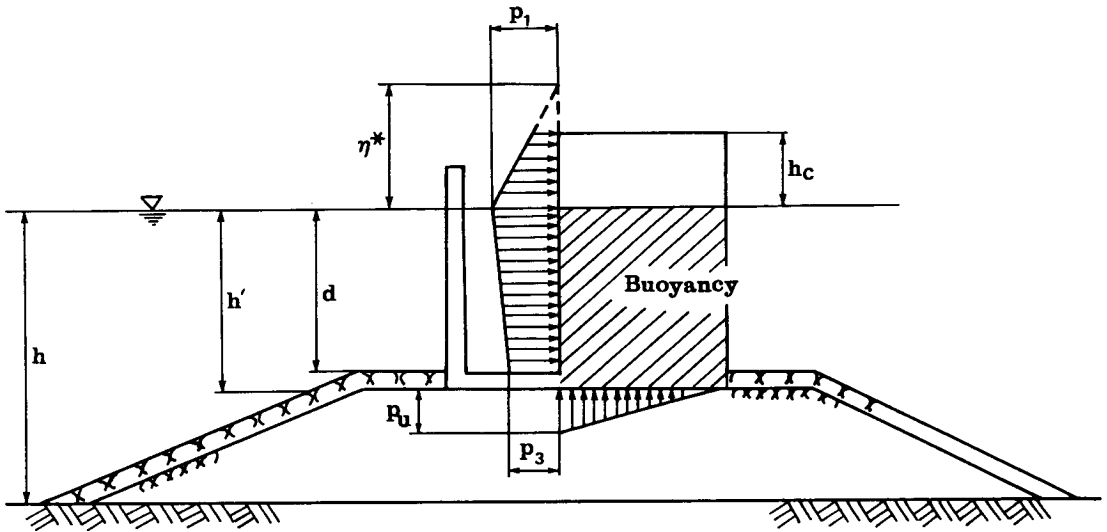


Fig. 2.4 Goda's modified diagram of wave pressure acting on a perforated-wall caisson (after Takahashi 1991)

유공케이슨에 작용하는 파압을 정밀분석하기 위해서는 파압이 케이슨의 각 부분(예를 들면, 케이슨 전면벽, 유수실 후벽 등)에 최대로 작용하는 위상을 몇 개 선택하여 각 위상별로, 또한 각 부분별로 파압보정계수를 따로따로 산정하여 위의 식들을 적용시키기도 한다. 일례로 Takahashi(1991)는 유공케이슨에 작용하는 파압의 위상을 Fig. 2.5에서와 같이 여섯 단계로 나누고 케이슨 각 부분에 작용하는 파력을 Fig. 2.6에서와 같이 판측하여 각 위상별 파압분포를 산정하였다. Fig. 2.6에서 활동합성파력, F_C 는

$$F_C = F_H \pm \mu F_V \tag{2.17}$$

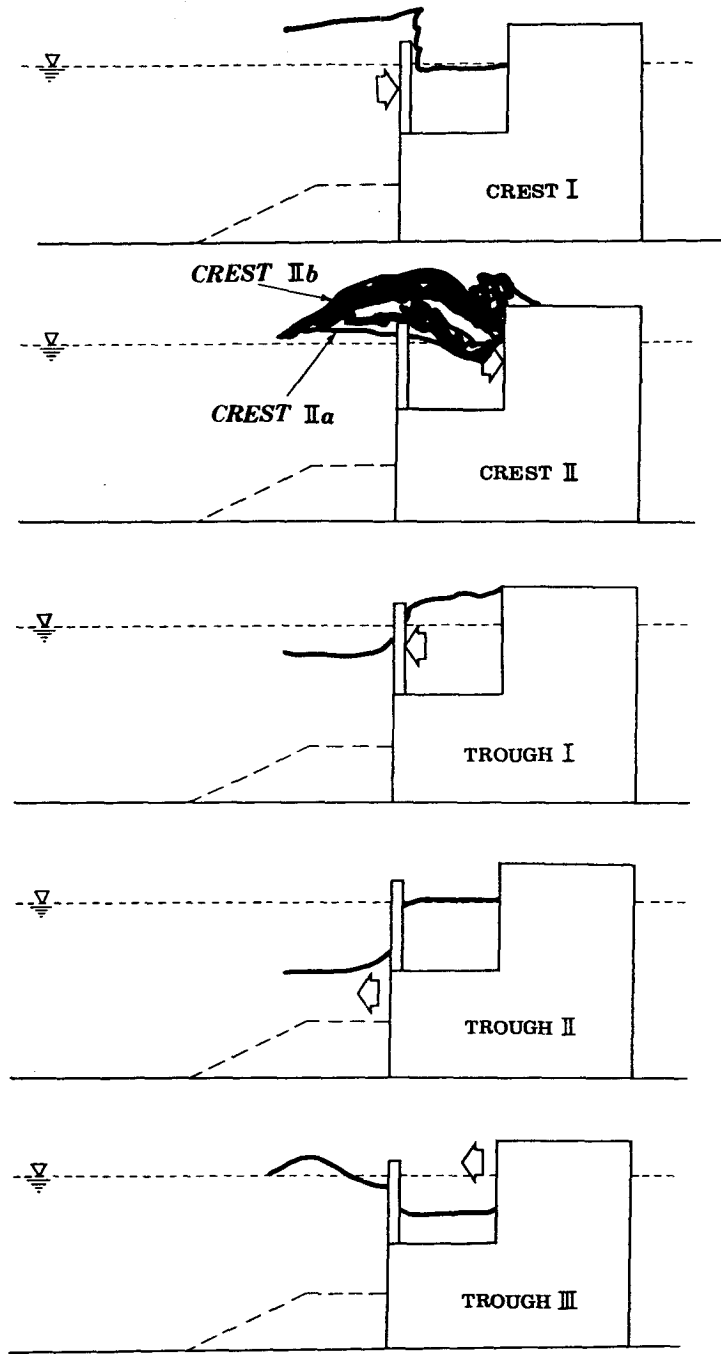


Fig. 2.5 Different phases of a wave impinging upon a perforated-wall caisson(after Takahashi 1991)

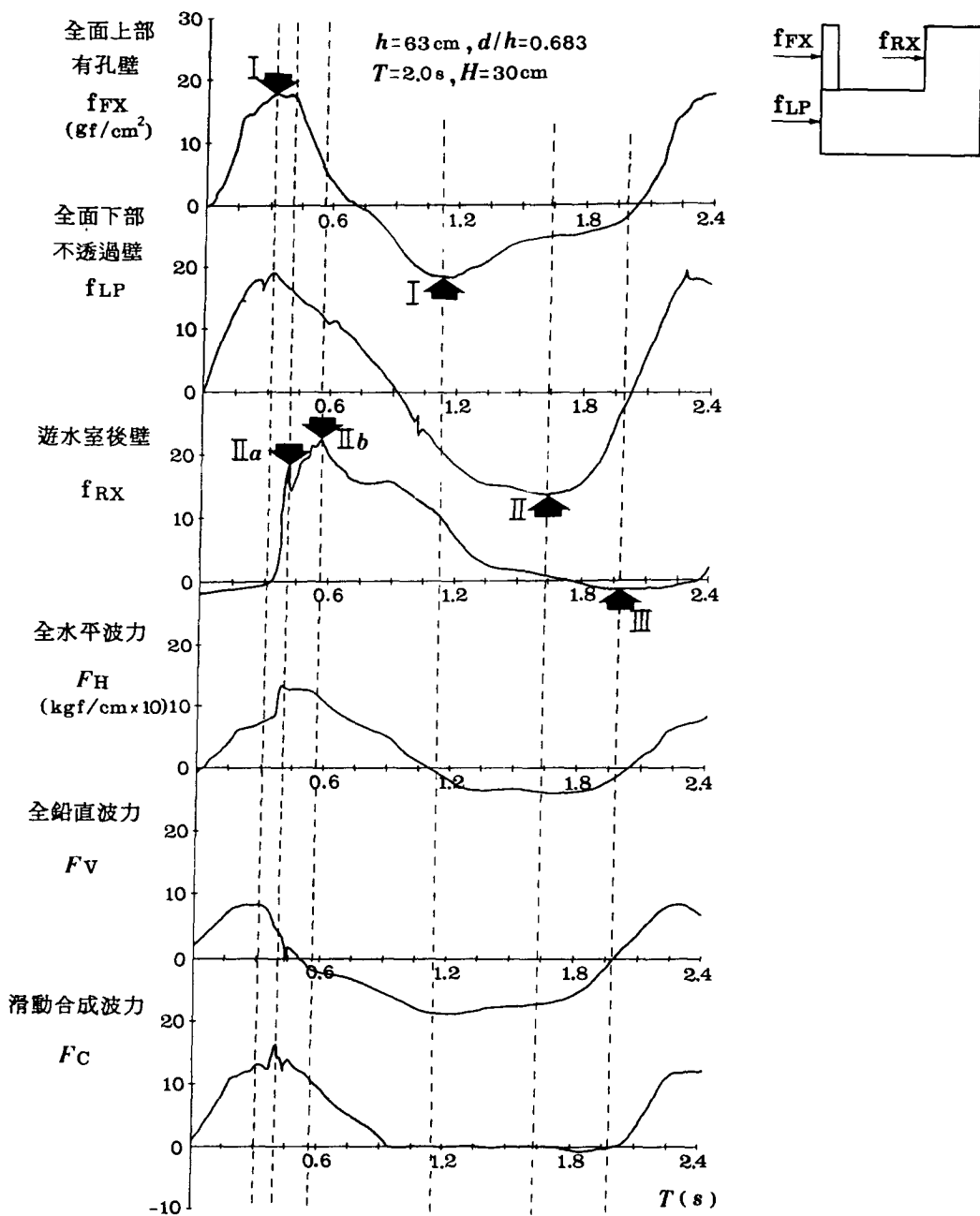


Fig. 2.6 Profiles of wave forces acting on a perforated-wall caisson. The arrows indicate the different phases explained in Fig. 2.5 (after Takahashi 1991)

로 나타내며, μ 는 마찰계수이고 \pm 는 F_H 의 부호와 일치하도록 취한다. Crest IIa 및 Trough I 위상에 대한 케이스 각 부분별 파압분포는 Fig. 2.7 및 2.8에 나타낸 바와 같으며, Crest 위상에 대하여 정수면 위치에서의 파압을 Goda 공식의 수정된 형태인

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_I\cos^2\beta) w_o H_{\max} \quad (2.18)$$

로 나타낼 경우 케이스 각 부분별 위상별 보정계수들은 Table 2.1에서와 같이 구해진다. 이러한 보정계수들은 케이스의 형상에 따라 달라질 것이므로 수리모형실험을 통하여 구해야 한다. 윗식에서 보정계수 α_I ($I = S, L$, 또는 R)는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\alpha_I = \alpha_{I0} \alpha_{I1}$$

$$\alpha_{I0} = \begin{cases} H/d & : (H/d < 2) \\ 2 & : (H/d \geq 2) \end{cases}$$

$$\alpha_{I1} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & : (\delta_2 \leq 0) \\ \frac{1}{(\cosh \delta_1)(\cosh \delta_2)^{1/2}} & : (\delta_2 > 0) \end{cases}$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \delta_{11} & : (\delta_{11} \leq 0) \\ 15 \delta_{11} & : (\delta_{11} > 0) \end{cases}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9 \delta_{22} & : (\delta_{22} \leq 0) \\ 6 \delta_{22} & : (\delta_{22} > 0) \end{cases}$$

$$\delta_{11} = 0.93 \frac{B_M}{L} + 0.36 \frac{h-d}{h} - 0.326$$

$$\delta_{22} = -0.36 \frac{B_M}{L} + 0.93 \frac{h-d}{h} - 0.518$$

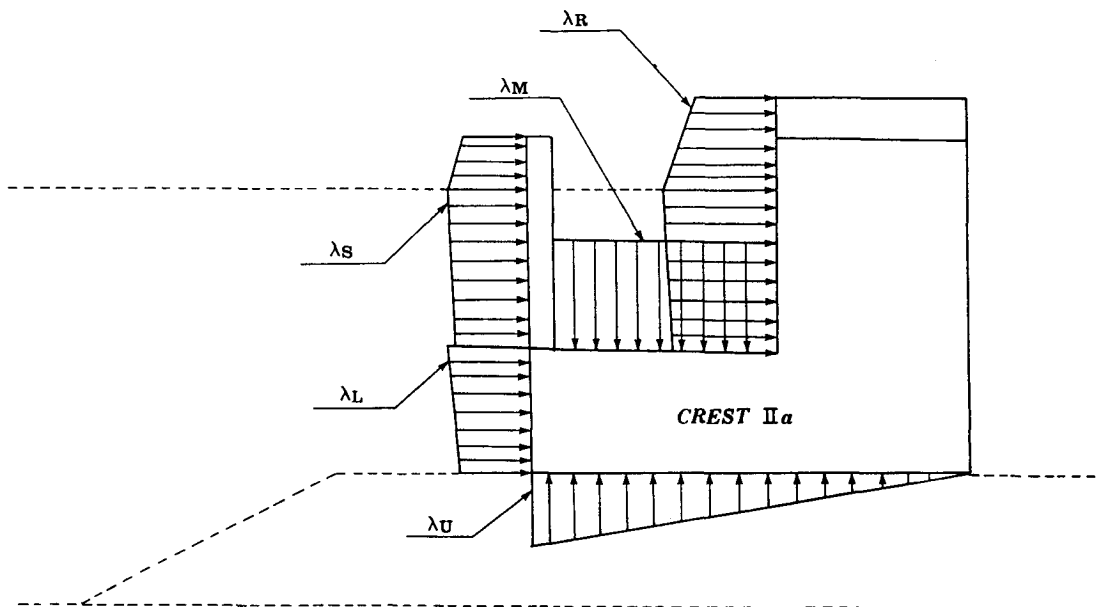


Fig. 2.7 Distribution of wave pressure on each part of a perforated-wall caisson at the phase Crest IIa (after Takahashi 1991)

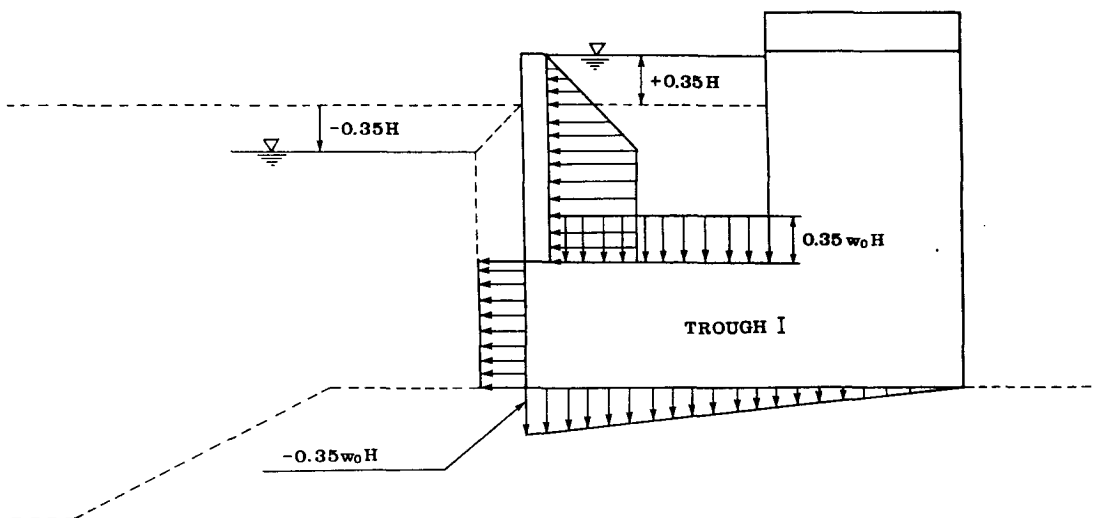


Fig. 2.8 Distribution of wave pressure on each part of a perforated-wall caisson at the phase Trough I (after Takahashi 1991)

Table 2.1 Modification factors for wave pressure acting on a perforated-wall caisson

		CREST I	CREST IIa	CREST IIb
有孔壁	λ_{s1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{s2}	0.4 ($\alpha_1 \leq 0.75$) 0.3/ α_1 ($\alpha_1 > 0.75$)	0	0
下部	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	0.4 ($\alpha_1 \leq 0.5$) 0.2/ α_1 ($\alpha_1 > 0.5$)	0	0
後床壁	λ_{R1}	0	$\frac{201}{3 L'}$ ($1/L' \leq 0.15$) 1.0 ($1/L' > 0.15$)	1.4 ($H/h \leq 0.1$) 1.6-2H/h ($0.1 < H/h < 0.3$) 1.0 ($H/h \geq 0.3$)
	λ_{R2}	0	0.56 ($\alpha_1' \leq 25/28$) 0.5/ α_1' ($\alpha_1' > 25/28$)	0
下版	λ_{M1}	0	$\frac{201}{3 L'}$ ($1/L' \leq 0.15$) 1.0 ($1/L' > 0.15$)	1.4 ($H/h \leq 0.1$) 1.6-2H/h ($0.1 < H/h < 0.3$) 1.0 ($H/h \geq 0.3$)
	λ_{M2}	0	0	0
揚壓力	λ_{U1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{U2}	0	0	0

B_M 은 케이슨 전면 마운드 Berm의 폭을 나타낸다. 유수실 후벽에 대한 補正係數 α_l' 은 d 를 유수실 내의 수심 d' 으로, L 을 L' 으로, B_M 을 $[l - (d - d')]$ 로 하여 계산한다. 여기서 l 은 유수실의 폭을 나타낸다.

제 3 장 케이슨에 작용하는 衝擊波의 특성

입사파의 파고가 증가하여 중복파의 쇠파한계를 넘게 되면 중복파의 파봉이 무너져 Fig. 3.1(b)에 나타낸 바와 같이 雙峰形의 파압형태를 보이게 된다. 파고가 더욱 증가함에 따라 쌍봉형의 파압형태는 앞의 정점이 뒤의 정점보다 높아지는 비대칭성이 커지면서 Fig. 3.1(c)에 나타낸 바와 같은 쇠파압의 형태를 보이게 된다. 방파제 前面의 海底面 傾斜, 또는 마운드 높이와 케이슨 전면 마운드 Berm 폭의 변화에 따라 어떤 경우에는 Fig. 3.1(d)에 나타낸 바와 같이 큰 파압이 순간적으로 작용하는 충격파압의 형태를 보이기도 한다. 충격파압은 케이슨의 안정은 물론 部材強度의 측면에서도 매우 중요하며 예측이 어려워서 방파제의 설계에 상당히 위협적인 요소가 되고 있다. 본 장에서는 충격파압에 관한 기존의 연구결과를 정리하여 요약함과 동시에 실험에 의한 충격파압의 관측예를 제시한다.

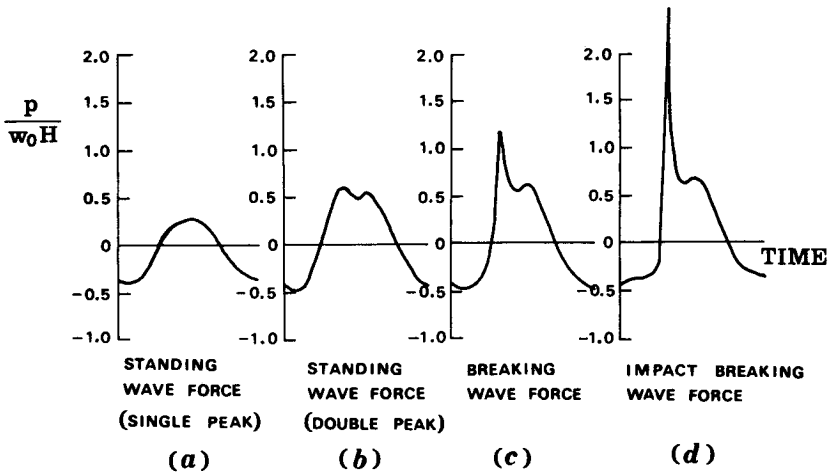


Fig. 3.1 Transition of wave force on a caisson from standing wave to impact breaking wave

제 1 절 충격파의 발생조건

충격파는 엄밀한 의미에서 파고에 대한 파압의 無次元量, p/w_0H 가 1 이상이면 충격파로 볼수 있으며, 통상 2 이상이 되면 심각하게 고려할만한 수준이라고 할 수 있다. 충격파는 마운드를 쳐오르는 파랑이 쇠파되며 케이슨 전면벽에 부딪히는 경우 발생하게 된다. 충격파의 발생조건은 수심, 波形傾斜, 방파제 전면의 해저면 경사, 마운드의 높이 및 케이슨 전면 마운드 Berm의 폭 등의 변화에 따라 달라지기 때문에 어느 한 가지 요소만 가지고 충격파의 발생조건을 설명하기는 어렵다. 충격파의 발생조건을 파악하기 위하여 Tanimoto 등(1981)은 模型床의 경사가 1:100, 마운드의 경사가 1:2.5인 실험조건에서 기타 실험요소들을 변화시키면서 실험을 수행한 바 있다. 일례로 $h/L = 0.0712$, $H/h = 0.719$ 인 경우 마운드의 형태의 변화에 따른 파압의 관측예를 Fig. 3.2에 도시하였다. 이 그림에서 가로축은 마운드 Berm의 폭, B_M 의 수심, h 에 대한 비를 나타내며, 세로축은 마운드 높이, $(h - d)$ 의 수심에 대한 비를 나타낸다. 이 경우 $B_M/h = 1.5$, $(h - d)/h = 0.6$ 부근에서 큰 충격파압이 발생하며 이 값들로부터 멀어짐에 따라 파압이 감소함을 알 수 있다. 수심에 비해 마운드가 아주 낮거나 Berm의 폭이 아주 작은 경우에는 방파제가 마운드가 없는 直立堤와 비슷하게 되어 케이슨 전면에 주로 중복파의 형태로 파압이 작용하게 되므로 작은 파압이 작용하게 되며, 반대로 마운드가 아주 높거나 Berm의 폭이 아주 큰 경우에는 마운드 상에서 쇠파가 발생하여 많은 에너지를 이미 잃어버린 상태에서 파랑이 케이슨에 도달하게 되므로 케이슨에 작용하는 파압이 작아지게 된다. 마운드의 형상이 달라지거나 파랑조건이 달라지게 되면 Fig. 3.2와 비슷한 형태를 갖으나 최대파압이 발생하는 마운드의 조건이 다소 변하는 결과를 얻게 될 것이다.

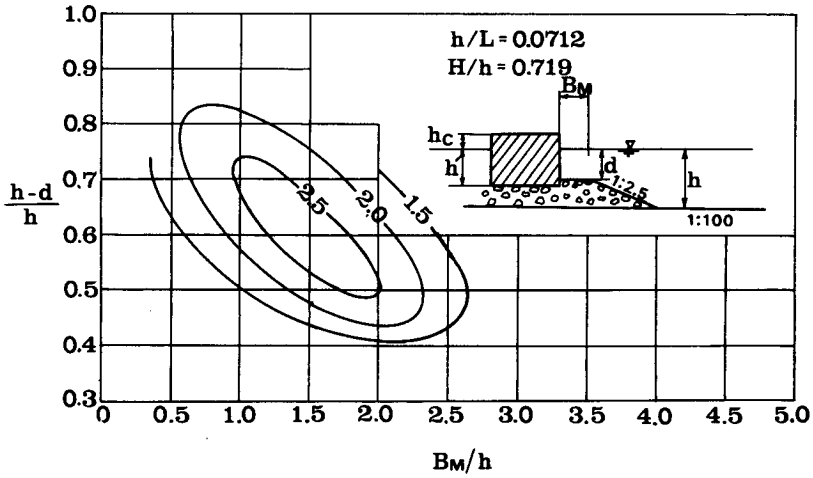


Fig. 3.2 Example of wave force variation due to mound configuration
(after Tanimoto et al. 1981)

제 2 절 충격파의 特性和 解析

충격파는 그 발생 메카니즘에 따라 몇 가지로 분류되며, 실험실에서 관측된 파압을 원형에서의 값으로 환산하는 방법이 각각 다르다. 따라서 관측된 충격파압의 형태로부터 그 발생 메카니즘을 규명하고 이에 따라 관측된 파압자료를 적절히 해석할 필요가 있다.

2.1 충격파의 특성

충격파에 대한 연구는 Lundgren(1969)에 의하여 처음으로 시작되었다. 그가 제시한 충격파압에는 다음의 세 종류가 있으며 이에 대한 정의는 Fig. 3.3과 같다 :

- 1) Ventilated shock,
- 2) Hammer shock,
- 3) Compression shock.

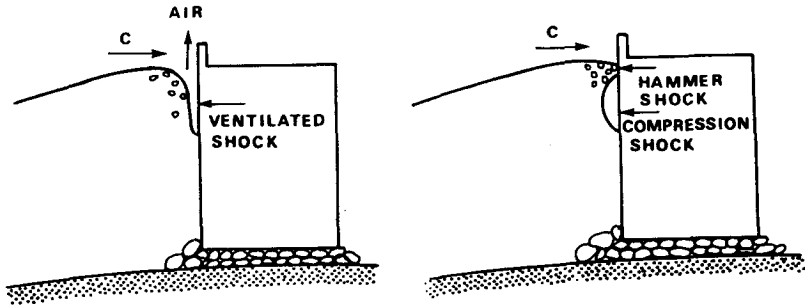


Fig. 3.3 Illustration of various kinds of impact breaking wave force
(after Jensen 1984)

Ventilated shock은 파랑이 케이슨의 하부로부터 위로 쳐올라가며 공기를 위로 밀어내는 형태로 발생하는 충격파로서, 파압은 처음에는 케이슨 하부에만 작용하다가 時差를 가지고 위로 傳播되는 형태를 나타낸다. Fig. 3.4는 부산직할시(1992)의 有孔防波堤 수리모형실험중 관측된 Ventilated shock의 한 예를 보여준다. 이 그림에서 맨 위의 곡선은 原型에서의 값으로 換算된 케이슨 전면에서의 수위변화를 나타내며 나머지 곡선들은 오른쪽 그림에 표시된 관측점에서의 무차원화 된 파압의 변화를 나타낸다. 시간은 실험에서의 시간을 그대로 나타내었다. 이 모형의 縮尺은 1/50이므로 $\sqrt{50}$ 을 곱하면 原形에서의 시간이 된다. 이 그림으로부터 파랑이 케이슨 전면을 쳐올라가면서 케이슨 하부로부터 발생한 충격파가 시차를 가지고 위로 전파되는 과정을 볼 수 있다.

Hammer shock은 Fig. 3.3(b)에서 볼 수 있듯이 Plunging 형태로 碎波되는 파랑의 頭部가 케이슨 전면을 Hammer로 치는 것같이 케이슨에 부딪히는 형태를 나타낸다. 케이슨 전면에서 Plunging 형태의 쇄파가 발생하게 되면 우선 Hammer shock이 발생하게 되고 Fig. 3.3(b)에 나타낸 바와 같이 파랑의 頭部가 공기가 위로 빠져나가지

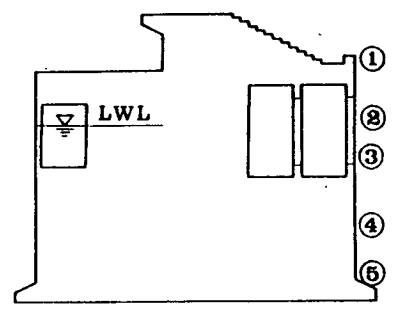
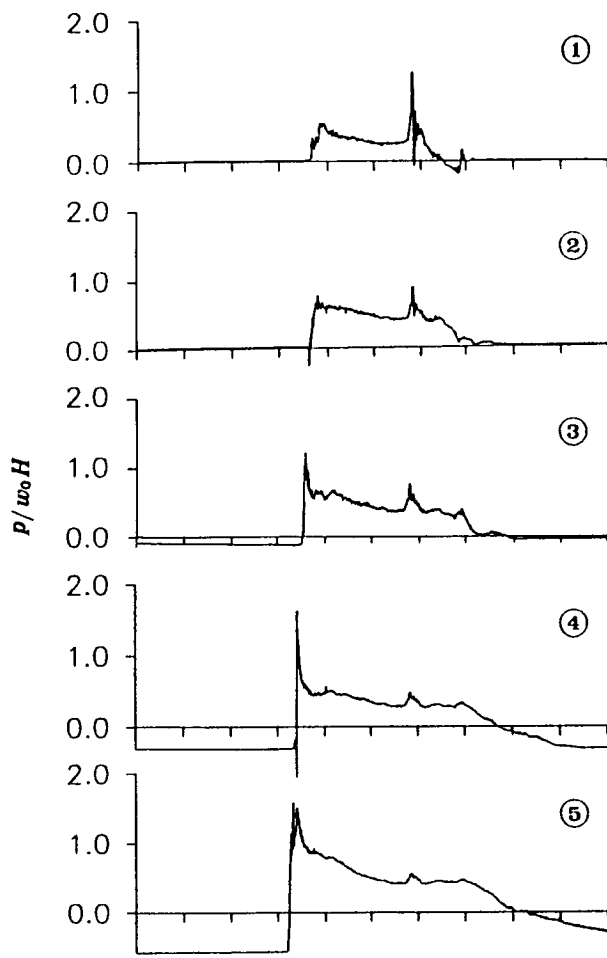
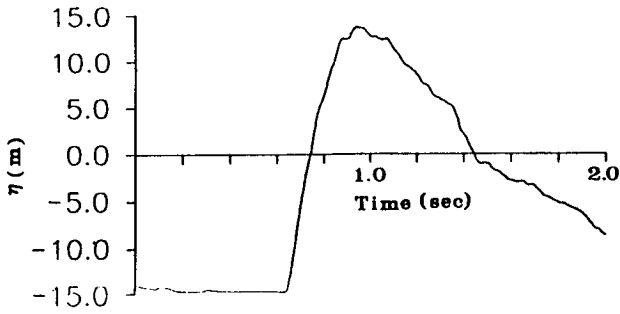


Fig. 3.4 Example of ventilated shock pressure observed in the hydraulic model test of Pusan artificial island breakwater.

못하도록 하여 케이슨 전면에 공기 주머니를 형성하게 된다. 이 공기 주머니가 압축되면서 케이슨에 작용시키는 충격파를 Compression shock이라 부른다. Froude 相似律을 따르는 방과제 수리모형실험시 Ventilated shock과 Hammer shock은 水粒子가 직접 케이슨에 부딪혀 파압이 작용하므로 Froude 상사율에 따라 모형에서 관측된 파압을 원형에서의 파압으로 환산할 수 있지만, Compression shock과 같이 압축된 공기가 케이슨에 파압을 작용시킬 경우에는 Froude 相似律과는 다른 소위 "Compression law"에 따라서 파압을 환산하게 된다.

이러한 충격파의 특성은 Lundgren(1969)외에도 Jensen(1984), Takahashi 등(1983)에 의하여 이론과 실험적인 연구가 계속되었다. 특히 Takahashi 등은 Ventilated shock과 Hammer shock을 Wagner형, Compression shock을 Bagnold형 파압이라 분류하고 이들의 파압특성에 대하여 다음과 같은 차이점들을 실험적으로 입증하였다. 첫째, Wagner형 衝擊波壓은 대개 순간적인 하나의 peak로 나타나지만 Bagnold형 충격파압은 peak가 발생한 이후 진동하는 특징을 보인다. 둘째, 전자는 케이슨의 다른 부분으로 파압이 전달되지 않지만, 후자는 수중음속(약 1,500 m/sec)의 속도로 전달되어 케이슨의 다른 부분에도 거의 동시에 peak를 발생시킨다. Bagnold형 충격파압의 관측예를 Fig. 3.5에 제시하였는데 이 그림은 부산 인공섬 外廓防波堤 기본설계사업의 일환으로 실시한 수리모형실험(부산직할시 1992)의 결과이다. 이 경우 충격파 발생은 Fig. 3.3(b)와는 약간 다른 메카니즘에 의한 것이지만 근본원리는 동일하다. 케이슨의 전면을 타고 쳐올라간 물이 케이슨 상부 계단 부분에 떨어지면서 공기를 휘말아 압축시킴으로써 Bagnold형 충격파압을 발생시키며, 이는 케이슨 전면과 유수실 내는 물론 케이슨 저면에까지도 전달됨을 볼 수 있다.

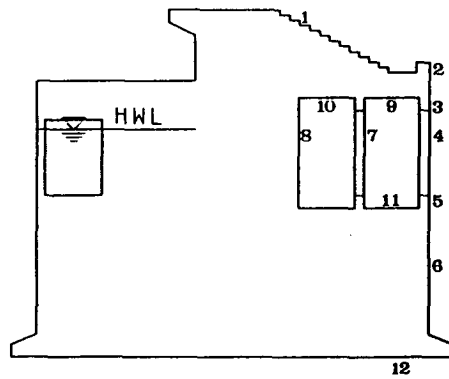
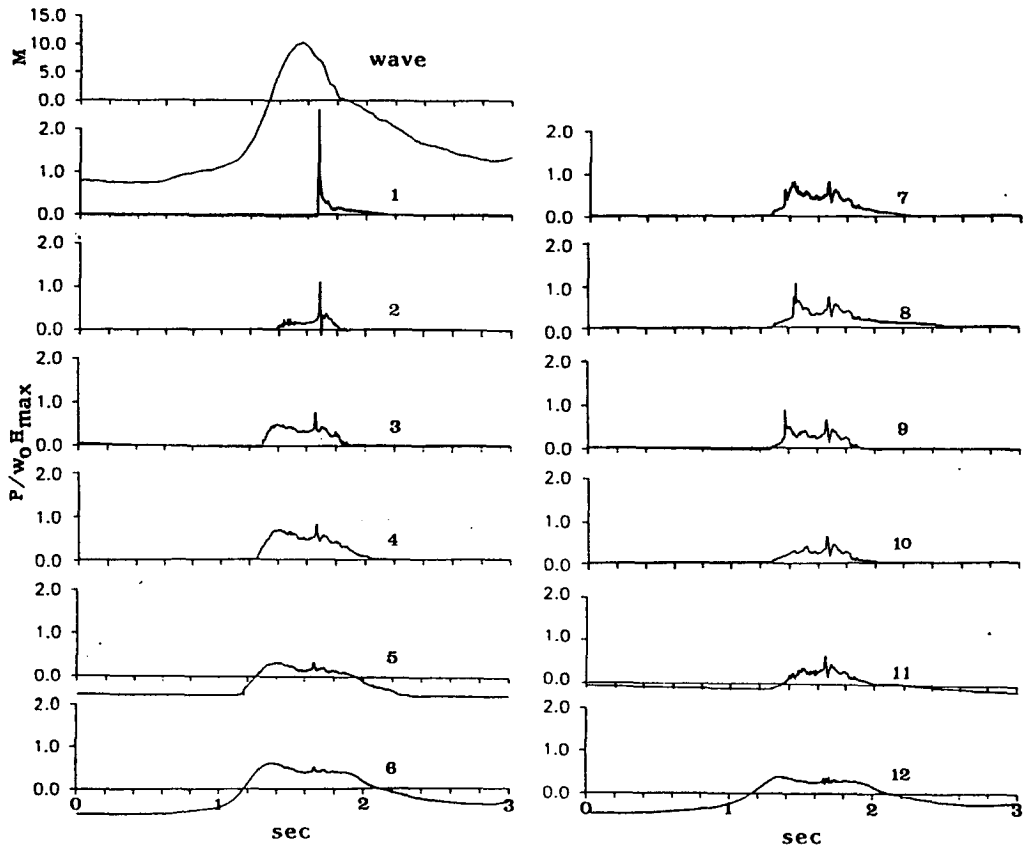


Fig. 3.5 Example of Bagnold-type impact wave pressure observed in the hydraulic model test of Pusan artificial island breakwater.

2.2 충격파의 解析

수리모형실험에서 관측된 충격파압을 원형에서의 값으로 환산할 때에 Wagner형 충격파압은 Froude 상사율에 따라 환산하면 되지만 Bagnold형 충격파압은 "Compression law"에 따라 해석해야 하며 Froude 相似律을 적용할 경우에는 파다설계를 유발한다. 이러한 Bagnold형 충격파압을 원형에서의 값으로 환산하기 위하여 Bagnold(1939)가 空氣壓軸에 의한 압력해석 모델을 제시하였으며 Mitsuyasu(1966)는 이를 압축공기가 새어 나갈 경우에 대하여 확장 해석하였다. 이 모델에 의하여 Bagnold형 파압을 원형에서의 값으로 환산하는 과정은 다음과 같다. 먼저 이 모델을 적용하기 위하여 공기 주머니의 압축 개념도를 Fig. 3.6에 제시하였다. 이 그림에서 l 은 공기층의 폭, D 는 공기층의 초기 두께, k 는 공기압축에 기여하는

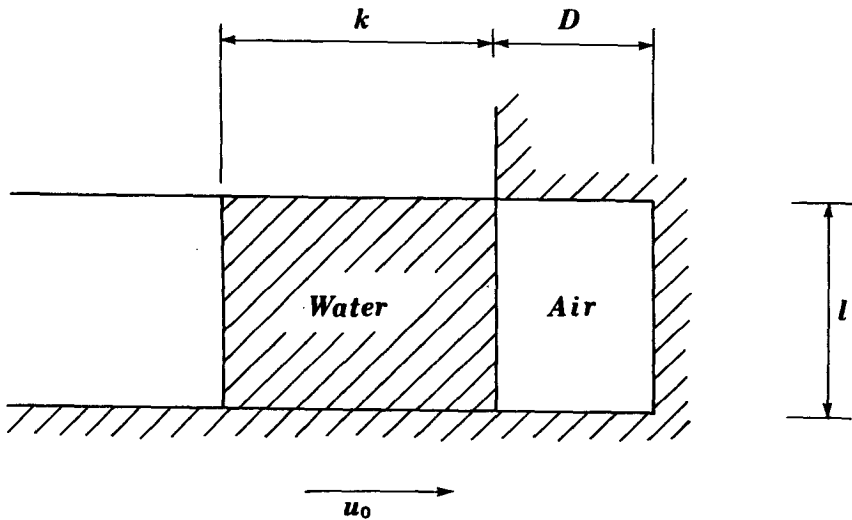


Fig. 3.6 Schematic diagram of Bagnold-type impact wave pressure
(after Takahashi et al. 1983)

수괴의 두께, u_o 는 공기층을 압축하는 水塊의 속도를 나타낸다. 공기층 내의 絶對壓力을 p_a , 大氣壓을 p_o , 압축에 따라 변화하는 공기층의 두께를 x 로 표시하면 水塊의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\rho_w k \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = p_a - p_o \quad (3.1)$$

여기서, ρ_w 는 물의 密度를 나타낸다. 초기조건은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -u_o, \quad x=D \quad (t=0) \quad (3.2)$$

한편, 공기층 내의 압력 p_a 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_a = p_o \left(\frac{D}{x} \right)^\gamma \quad (3.3)$$

여기서, γ 는 공기의 比熱比常數(Specific heat ratio constant)로 1.4이다. 이 식을 식 (3.1)에 대입하여 식 (3.2)의 초기조건을 이용하여 적분하면

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = u_o^2 - \frac{2p_o}{\rho_w k} \left(\frac{D}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{x}{D} \right)^{1-\gamma} - 1 \right\} - (D-x) \right) \quad (3.4)$$

와 같다. 이 식의 해를 구하기 위해서는 數值積分을 해야하지만 $dx/dt=0$ 일 때 압력의 최대치 p_{ap} 가 발생한다는 사실에 착안하여 그때의 공기층의 두께를 x_1 이라 하면

$$\frac{\rho_w k u_o^2}{p_o D} = 5 \left(\frac{D}{x_1} \right)^{0.4} + 2 \left(\frac{D}{x_1} \right)^{-1} - 7 \quad (3.5)$$

$$\frac{p_{ap}}{p_o} = \left(\frac{D}{x_1} \right)^{1.4} \quad (3.6)$$

가 되고 이 두 식으로부터

$$\frac{\rho_w k u_0^2}{p_o D} = 5 \left(\frac{p_{ap}}{p_o} \right)^{\frac{2}{7}} + 2 \left(\frac{p_{ap}}{p_o} \right)^{-\frac{5}{7}} - 7 \quad (3.7)$$

의 결과를 얻는다. 즉, 압력의 최대치는 무차원 변수 $\rho_w k u_0^2 / (p_o D)$ 의 값을 알면 구할 수 있는데, 이 무차원 변수를 Bagnold 數라 부르고 다음과 같은 기호로 표시한다.

$$B_g = \frac{\rho_w k u_0^2}{p_o D} \quad (3.8)$$

절대압력, p_{ap} 의 계기압력, $p_p = p_{ap} - p_o$ 를 대기압, p_o 에 대한 무차원량, p_p/p_o 로 나타냈을 때 식 (3.7)로부터 구한 B_g 와 p_p/p_o 의 관계는 Fig. 3.7과 같다.

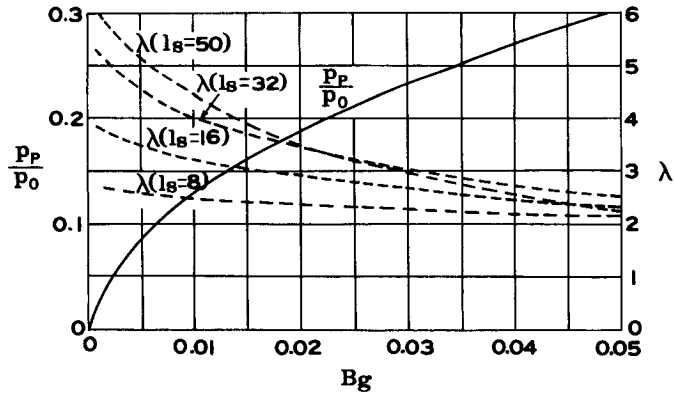


Fig. 3.7 Adjustment factor of peak pressure (after Takahashi et al. 1985 and 부산직할시 1992)

실험에서 관측된 Bagnold형 파압을 식 (3.7) 또는 Fig. 3.7을 이용하여 원형에서의 값으로 환산할 때에는 補正係數 λ 를 사용하는데 이를 구하는 방법은 축척 $1/l_s$ 의 모형의 경우 다음과 같다. 우선 모형에서 관측된 파압, $(p_p)_m$ 으로부터 이에 해당되는 모형에서의 Bagnold 수, $(B_g)_m$ 을 구한다. 식 (3.8)에서 물의 밀도, ρ_w 와 대기압, p_o 가 모형과 원형에서 같은 값을 갖고, 다른 물리량들은 模型과 原型 사이에 Froude 상사율을 따른다면 원형에서의 Bagnold 수, $(B_g)_p$ 는 모형의 Bagnold 수의 l_s 배가 된다: 즉 $(B_g)_p = l_s (B_g)_m$. 이와 같이 구한 $(B_g)_p$ 에 대한 파압을 식 (3.7) 또는 Fig. 3.7로부터 구하게 되면 이것이 원형에서의 파압, $(p_p)_p$ 가 된다. 波壓補正係數, λ 는

$$\lambda = \frac{l_s (p_p)_m}{(p_p)_p} \quad (3.9)$$

의 식으로 계산되며 축척에 따른 보정계수, λ 의 변화를 Fig. 3.7에 도시하였다. 윗식을 다시 쓰게 되면

$$(p_p)_p = \frac{l_s}{\lambda} (p_p)_m \quad (3.10)$$

으로 나타낼 수 있는데, 이는 Bagnold형 충격파압의 경우 모형에서 관측된 파압을 원형에서의 값으로 환산할 때 다른 물리량들은 Froude 상사율을 따른다 할지라도 파압만은 축척, l_s 대신 l_s/λ 를 곱해서 구해야 함을 의미한다. 보통 불규칙파를 이용한 수리모형실험시 안전측의 실험결과를 제시하기 위하여 실험중 관측된 Bagnold형 충격파압의 최대치에 대한 波壓補正係數, λ (즉 λ 의 最小值)를 구하여 그 실험중 발생한 다른 모든 Bagnold형 충격파압에 대하여 일률적으로 적용하게 된다.

제 4 장 水理模型實驗

無孔케이슨과 有孔케이슨의 水理特性和 波壓特性을 파악하기 위하여 각각의 모형을 제작하여 수리모형실험을 실시하였다. 유공케이슨은 무공케이슨과는 달리 케이슨 前面이 有孔壁으로 되어 있다는 것 이외에도 遊水室의 상부가 열려있어서 수리특성과 파압특성이 무공케이슨과 상당히 차이가 있을 것으로 예상된다. 이러한 특성과파압을 위하여 케이슨 전면과 후면에 파고계를 설치하여 반사파, 전달파 그리고 쳐올림 높이 등을 측정하였으며 케이슨에는 파압계를 설치하여 파압을 측정하였다.

제 1 절 실험장치 및 관측기기

1.1 造波水槽

실험에 사용된 수조는 Fig. 4.1에 보인 바와 같이 길이 53.0m, 높이 1.25m, 폭 1.0m의 크기로서, 수조의 상류쪽 13m와 하류쪽 7m 구간은 양측벽이 철재로 되어 있으며 나머지 중앙부분 33m의 양측벽은 強化유리로 되어 있어 거의 모든 실험 구간의 관찰이 가능하다. 조파기는 유압펌프에 의해 작동되는 피스톤형으로 最大 離隔距離가 $\pm 50\text{cm}$ 이며 조파기의 후면과 수조의 하류쪽 끝에는 傾斜式 消波裝置가 설치되어 있다.

이 수조는 波浪과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 복합수조로서, Fig. 4.1에 보인 바와 같이 수조 저면에 설치된 흐름상자 (Current Box)의 입구를 열고 펌프를 작동시킴으로써 필요시 흐름을 발생시킬 수 있다. 이 흐름상자들은 수조의 하부에서 파이프를 통하여 서로 연결되어 있다. 본 실험에서는 펌프는 작동시키지 않은 상태에서 중앙 흐름상자의 입구는 닫고, 上·下流쪽 흐름상자의 입구를 약간만 열어놓은 상태에서

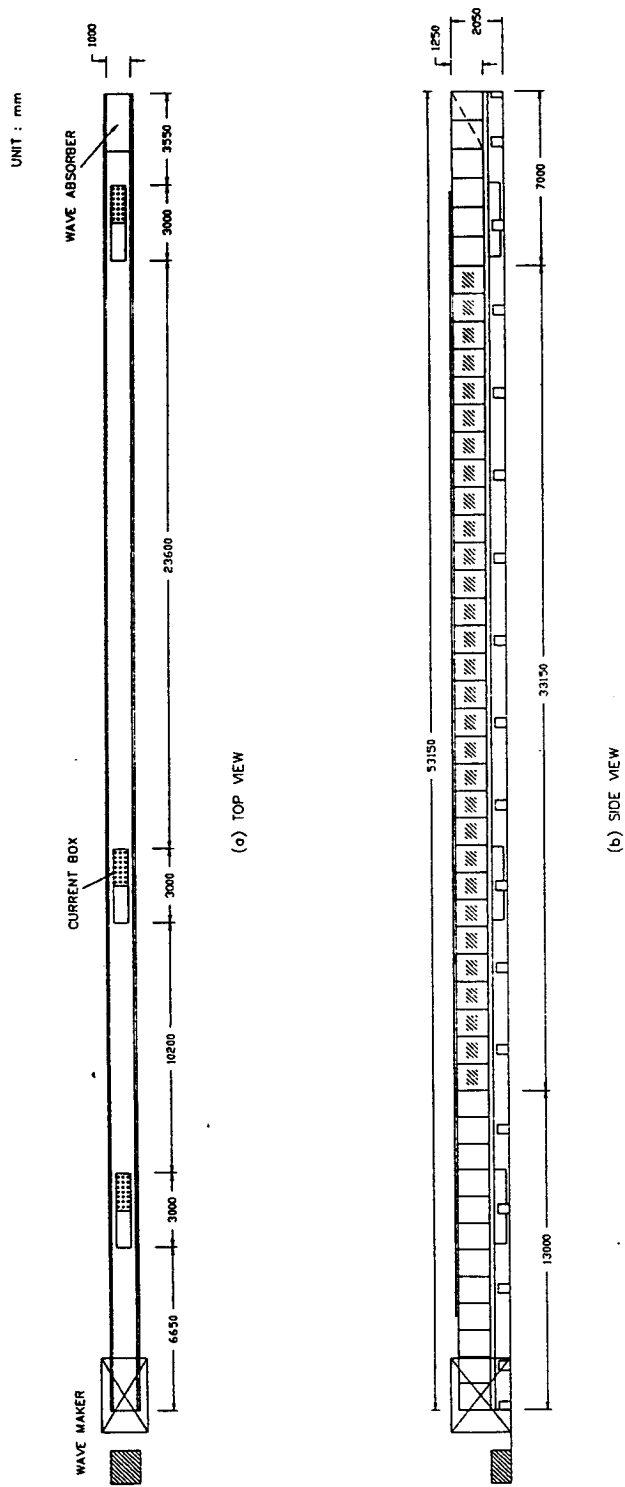


Fig. 4.1 Two dimensional wave-current generation flume

실험을 실시함으로써 방파제 전면과 후면 사이에 파이프를 통하여 微細한 흐름발생을 허용하여 越波로 인한 방파제 전면과 후면 사이의 과도한 수위차의 발생을 방지함으로써 실험조건이 가능한 한 현장조건과 유사하도록 하였다.

1.2 파고계

사용된 파고계는 저항식이며 길이는 80cm이다. 파고계 양단의 비선형 구간을 제외하면 측정범위는 파고계의 중앙으로부터 $\pm 25\text{cm}$ 이다.

1.3 파압계

파압 측정은 센서의 직경이 8 mm인 超小形 파압계를 사용하였으며, 측정범위는 $0 \sim 200 \text{ gf/cm}^2$ 와 $0 \sim 500 \text{ gf/cm}^2$ 의 두 가지가 있다. 파압계는 형태가 서로 다른 附着式과 挿入式을 사용하였다. 부착식 파압계는 두께 약 3 mm의 센서를 양면 테이프를 이용하여 모형 표면에 직접 부착하여 사용한다. 삽입식 파압계는 부착식과 동일한 센서가 두께 10 mm, 直徑 25 mm의 원형 아크릴판 안에 장착되어 있어서 모형에 직경 25 mm의 구멍을 뚫고 여기에 파압계를 집어넣어 고정시킴으로써 파압계 센서와 모형의 部材가 일체가 되도록 하여 사용한다. 즉, 부착식은 센서가 모형 표면 위로 약 3 mm 정도 돌출되지만, 삽입식은 센서의 표면이 모형의 부재면과 같게 된다.

제 2 절 케이스 모형의 제작

케이스는 아크릴로 제작하여 저면에 콘크리트판을 부착하였다. 케이스 본체와 콘크리트판 사이에는 두께 4 mm의 철판과 고무판을 삽입하였다. 철판은 케이스를 들어서 옮길 때 케이스의 무게를 지지하기 위한 것이며 철판 양쪽에는 로프를 맬 수 있는 고리가 부착되어 있다. 고무판은 철판과 콘크리트판 사이에서 마찰과 緩衝作用을 하기

위한 것이다. 철판과 케이슨의 아크릴판은 직경 5 mm 볼트로 4 지점에서 연결하였으며, 아크릴판, 철판, 고무판, 콘크리트판은 다시 직경 10 mm 볼트로 4 지점에서 연결하여 상대적인 움직임이 거의 없도록 하였다.

케이슨의 모형들은 두께 10 mm 아크릴판으로 제작하였다. 두께 10 mm 아크릴판을 사용한 이유는 사용된 挿入式 과압계의 센서가 두께 10 mm, 직경 25 mm의 원형 아크릴판에 장착되어 있기 때문에 모형의 아크릴판에 직경 25 mm의 구멍을 내고 여기에 과압계를 집어넣어 고정시킴으로써 과압계와 케이슨 부재를 일체로 만들어 쓰기 위함이다. 케이슨은 수조의 좌우 側壁쪽에 들어가는 길이 각 30 cm인 두 개의 케이슨과 그 사이에 들어가는 길이 38.6 cm 한 개를 포함하여 총 3 개로 분할 제작되었다. 과압관측은 중앙 케이슨에 대해서만 실시하였다. 케이슨과 방파제의 마운드 및 수심의 재원은 Fig. 4.2와 같다. 이 그림은 유공케이슨을 나타내고 있는데 有孔壁은 높이 12cm, 폭 1.8cm의 縱 slit로 되어 있고 slit 사이의 부재폭은 교대로 3.2 및 2.6cm로서 有孔率은 약 27 %이다. 유수실은 폭이 18cm이며 상부가 열려 있는 형태이다. 한편, 무공케이슨은 유공케이슨의 유공벽을 無孔壁으로 교체하고 유수실 상부를 아크릴판으로 밀폐하여 사용하였다.

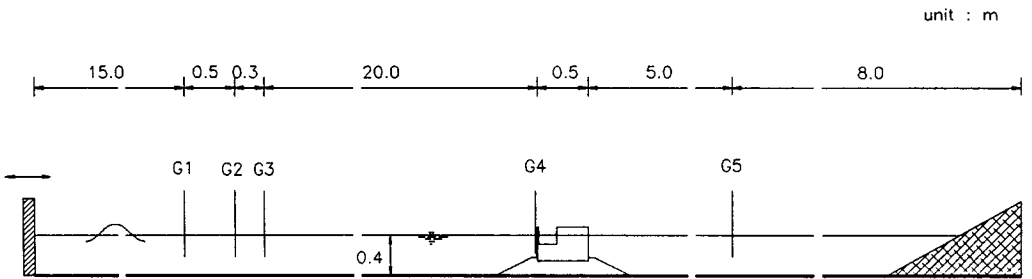


Fig. 4.2 Specification of the perforated-wall caisson breakwater

제 3 절 관측 및 자료분석

2차원 파랑-흐름 복합수조에서 Fig. 4.3과 같이 조파기로부터 약 35m 거리에 방파제를 설치하고 입사파와 반사파를 측정하기 위하여 방파제 전면에 3개의 파고계를, 전달파를 측정하기 위하여 방파제 후면에 1개의 파고계를 설치하였으며 방파제 전면의 쳐올림 높이를 측정하기 위하여 1개의 파고계를 설치하였다. 파랑조건은 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 그리고 1.8초의 5개 주기에 대하여 각 주기마다 4-5개 정도의 파고가 다른 規則波를 설정하였다.

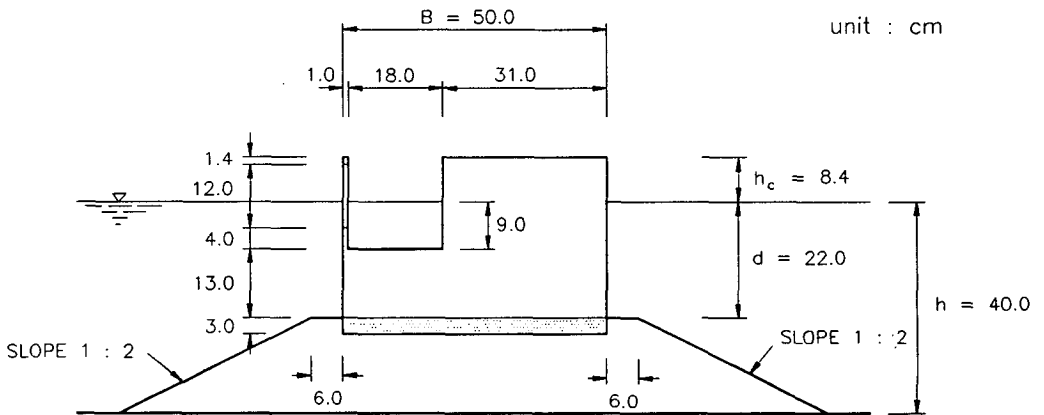


Fig. 4.3 Location of breakwater and wave gauges

실험방법은 실험대상 파랑이 규칙파이므로 장시간 실험을 할 필요가 없기 때문에 방파제에서 반사된 파가 조파판에서 再反射되어 다시 방파제 前面의 3개의 파고계를 통과할 때까지 실험하였다. 이와 같이 관측된 파랑자료중 입사파와 반사파가 공존하는

구간의 자료를 Mansard and Funke(1980)의 3점법에 의하여 분석하여 입·반사파를 분리하였다. 파랑자료는 20Hz로 독취하였으며 파압자료는 50Hz로 독취하여 정밀성을 더욱 높였는데, 이는 파랑은 급격한 변화가 없지만 파압은 충격파와 같이 순간적으로 작용하는 요소가 존재하기 때문이다. 파압측정을 위해서는 最大容量 200gf/cm^2 와 500gf/cm^2 의 두 종류의 파압계를 無孔케이스와 有孔케이스에 설치하였는데 각 케이스에 설치된 파압계의 위치는 Fig. 4.4 및 4.5와 같다. 무공케이스에는 前面壁에 5개, 揚壓力 측정을 위하여 케이스 底面에 1개, 케이스 상부 1개를 포함하여 총 7개의 파압계를 설치하였다. 유공케이스의 경우에는 무공케이스와 마찬가지로 전면벽에 5개, 케이스 저면에 1개를 설치하고 유수실내의 파압특성을 파악하기 위하여 有孔壁 後面에 1개, 유수실 후면벽에 1개, 유수실 저면에 2개 등, 총 10개의 파압계(P1부터 P10까지)를 설치하여 1차적으로 파압관측을 실시하였다. 한편, 유공벽 전후면에 작용하는 파압을 보다 정밀하게 관측하기 위하여 위에 열거한 10개의 파압계중 부착식 파압계 3개를 P1', P2' 및 P3'으로 옮겨 놓은 후 2차 파압관측을 실시하였다. 이 경우 동일한 규칙파를 사용하여 1,2차 관측에 공동으로 사용된 파압계의 기록을 비교한 결과, 거의 차이가 없었다. 따라서, 유공케이스의 경우 13개의 파압계를 동시에 사용한 것으로 가정하고 파압분석을 실시하였다.

unit : cm

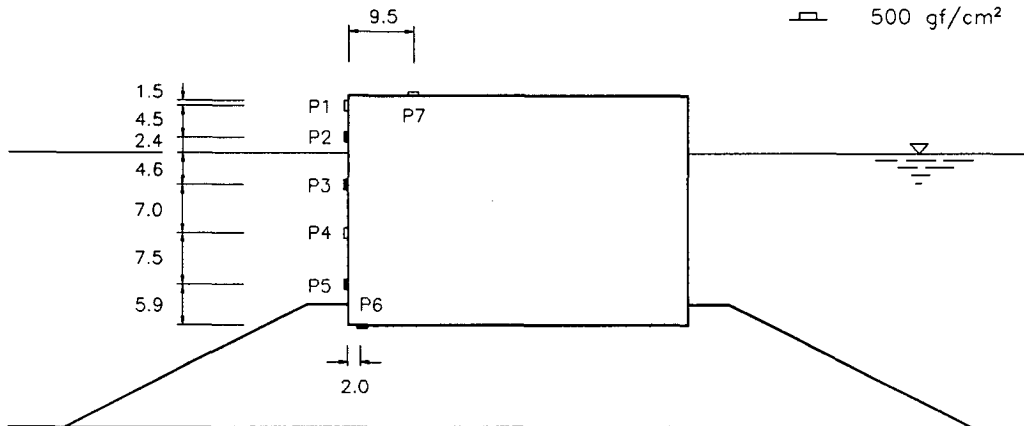


Fig. 4.4 Location of pressure gauges for the solid-wall caisson

unit : cm

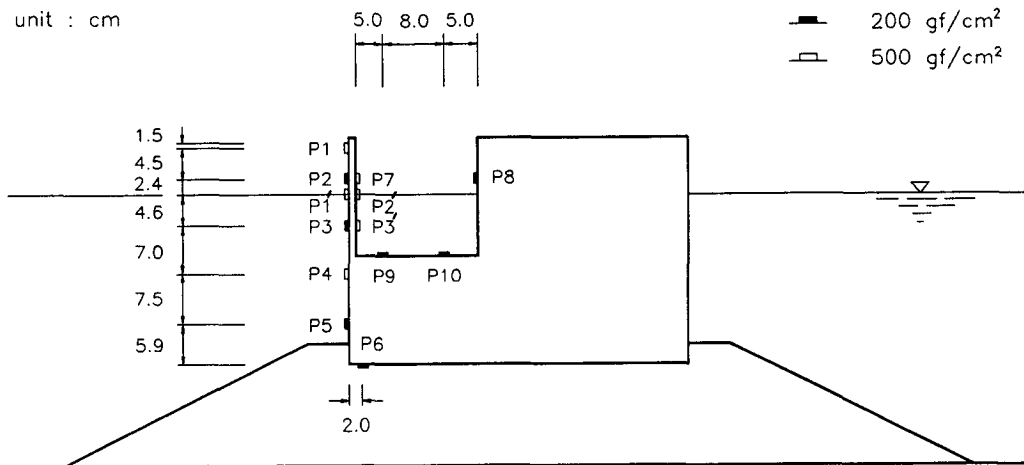


Fig. 4.5 Location of pressure gauges for the perforated-wall caisson

제 5 장 實驗結果 및 分析

제 1 절 케이슨의 水理特性

1.1 反射率

방파제 전면에 설치한 3개의 파고계로부터 파랑의 시그널을 독취하고 이 3개의 독립된 시그널에 대하여 Mansard and Funke(1980)의 3點法을 적용하여 입사파와 반사파의 시그널을 분리하였다. 반사율은 입사파고에 대한 반사파고의 比로 나타내었으며 무공케이슨, 유공케이슨 공히 각 파랑주기와 파고에 대하여 그 결과를 Table 5.1에 제시하였다. 이 표에서 무공케이슨과 유공케이슨이 갖는 반사율을 비교하면 전 파랑에 대하여 유공케이슨의 반사율이 무공케이슨의 반사율보다 27 - 35% 작음을 알 수 있다. 무공케이슨과 유공케이슨의 반사율 특성을 도시하면 Fig. 5.1 및 5.2와 같다. Fig. 5.1은 波形傾斜에 따른 무공케이슨과 유공케이슨의 反射率을 비교한 것인데 유공케이슨의 반사율이 훨씬 작음을 알 수 있다.

Fugazza and Natale(1991)에 의하면 이론상 유공케이슨의 반사율은 유수실 내의 파장, L_c 에 대한 유수실 폭의 비(B/L_c)가 약 0.25일때 유수실 내의 共振現象에 의하여 최소가 되며, Tanimoto et al.(1976b)의 실험에 의하면 방파제 전면에서의 파장, L 에 대한 유수실 폭의 비(B/L)가 0.15 - 0.2일 때 최소가 된다. 본 실험에서는 유수실 폭이 고정되어 있는 상태에서 波長을 더 이상 줄일 수 없어서 B/L_c 가 0.2 이하, B/L 이 0.13 이하인 경우에만 실험하였기 때문에 반사율이 최소가 되는 점을 포함하지 않는다. 그러나 Fig. 5.2에 제시된 바와 같이 B/L 이 0.15보다 작은 범위에서 B/L 이 증가할수록 반사율이 작아지는 경향은 기존의 연구결과와 일치하였다.

Table 5.1 Hydraulic characteristics(reflection, transmission, runup) of caisson.

T(s)	Hi(cm)	無孔 케이슨			有孔 케이슨		
		반사율	전달율	쳐올림(cm)	반사율	전달율	쳐올림(cm)
1.0	12.2	0.53	0.07	22.8	0.38	0.02	18.4
	11.0	0.52	0.08	19.9	0.29		18.0
	9.5	0.56	0.02	20.1	0.35		16.5
	8.5	0.73		17.4	0.42		14.1
	5.5	0.79		11.8	0.35		10.6
1.2	14.5	0.69	0.11	28.0	0.38	0.02	22.8
	12.0	0.72	0.05	24.0	0.43		20.0
	9.0	0.78	0.03	19.2	0.46		15.6
	6.2	0.81		12.6	0.40		10.0
1.4	14.5	0.71	0.09	27.8	0.47	0.02	24.0
	11.5	0.78	0.03	22.0	0.48		18.8
	9.5	0.78		18.6	0.45		15.3
	7.5	0.79		14.8	0.44		12.0
	5.5	0.81		10.8	0.43		9.0
1.6	14.5	0.77	0.10	27.0	0.55	0.04	24.0
	11.5	0.84	0.05	22.4	0.56		20.0
	9.0	0.84		17.4	0.53		14.8
	6.5	0.81		12.6	0.50		10.5
	5.5	0.86		10.6	0.48		8.8
1.8	15.0	0.78	0.13	28.8	0.57	0.05	25.2
	12.0	0.80	0.05	23.2	0.59		20.0
	9.0	0.80		18.0	0.54		15.2
	5.8	0.79		11.6	0.51		10.0

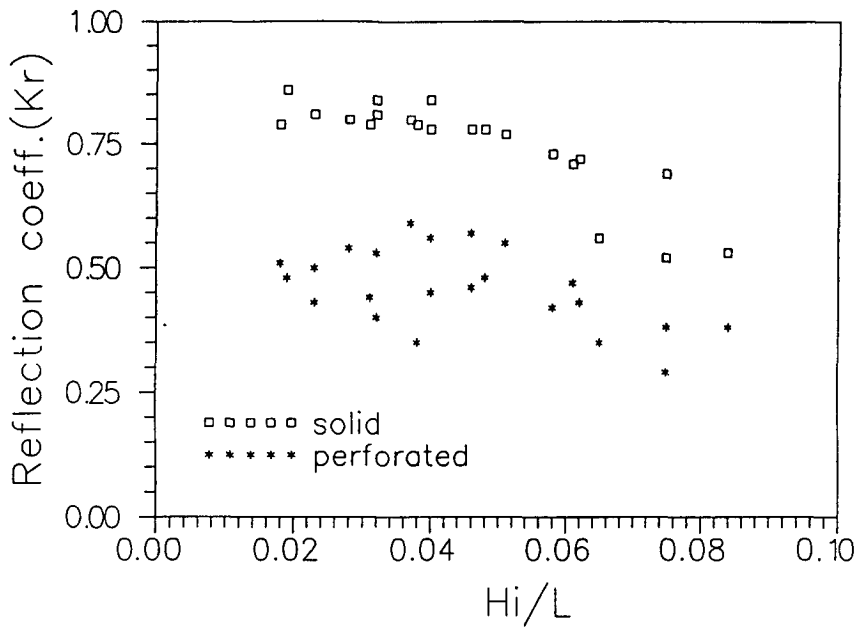


Fig. 5.1 Reflection coefficient versus wave steepness for solid-wall and perforated-wall caisson

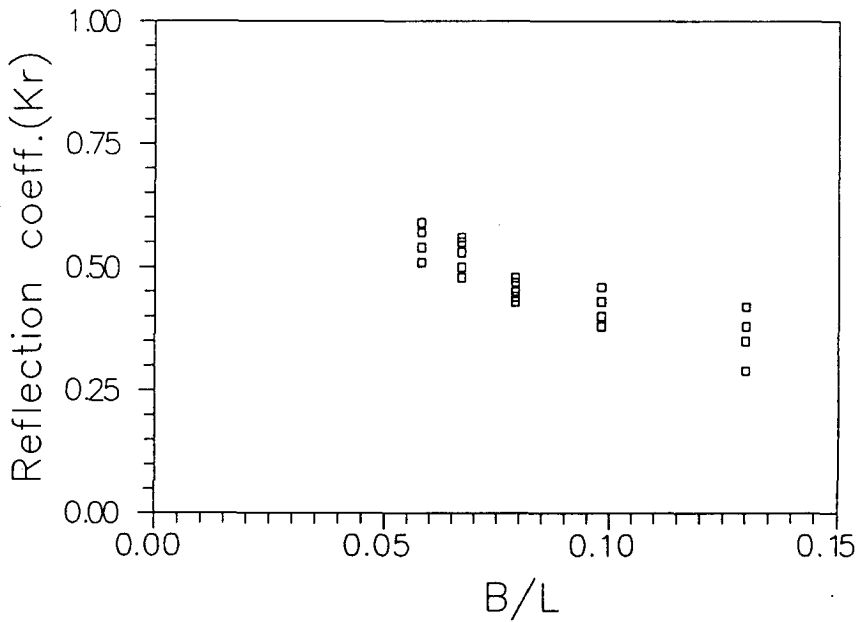


Fig. 5.2 Reflection coefficient versus one-dimensionalized wave chamber width for perforated-wall caisson

1.2 傳達率

방파제 후면에 설치한 파고계 기록으로부터 구한 平均波高의 입사파고에 대한 비로서 전달율을 계산하여 Table 5.1에 나타내었다. 越波에 의한 방파제 배후에서의 파랑은 규칙파인 경우에도 상당히 불규칙하게 나타나기 때문에 평균파고를 사용하였는데 평균파고의 물리적 의미는 별로 중요하지 않으며 여기에서는 각 실험파랑에 대한 월파의 상대적 크기를 비교하기 위하여 제시하였다. 전달율 역시 반사율과 마찬가지로 입사파랑의 波形傾斜가 증가할수록 커지며, 유공케이슨의 경우가 무공케이슨의 경우에 비해서 전달율이 작게 나타남을 알 수 있다.

1.3 처음림 높이

방파제 전면벽에 설치한 파고계 기록을 분석하여 靜水面상으로부터의 처음림 높이의 평균치를 계산하였다. Table 5.1에서 무공케이슨에 비해 유공케이슨이 처음림 높이가 작게 나타남을 알 수 있으며, 전반적으로 입사파랑의 波形傾斜가 클수록 커지는 경향을 보여준다.

제 2 절 波壓特性

케이슨에 설치된 각 파압계로부터 파압기록을 득취하여 파랑에 의한 동수압을 계산하였다. 기록득취는 파압의 변화가 비교적 규칙적으로 반복되는 時間領域을 선택하여 수행하였다. 파압 분석시 케이슨 전면벽 또는 유공케이슨의 유수실 후면벽에 발생하는 衝擊波壓의 정량적인 분석은 제외하였다. 케이슨 주변의 파압분포도와 파랑의 位相에 따른 파압의 특성변화를 분석, 그 결과를 제시하였다.

2.1 케이슨에 작용하는 最大波壓分布

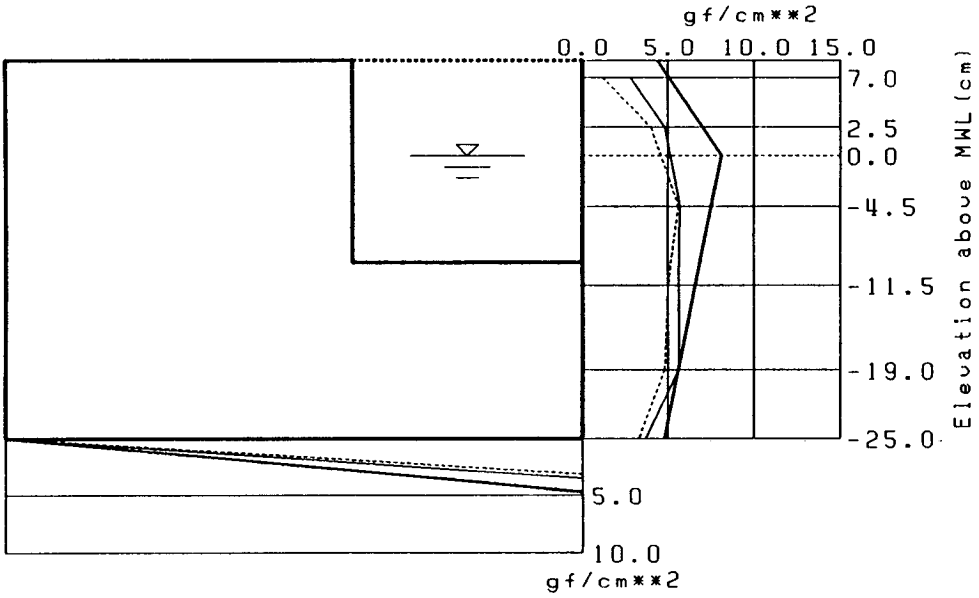
무공케이슨과 유공케이슨 공히 케이슨 전면벽과 저면에 작용하는 파압기록을 분석하여 그 결과를 Table 5.2, 5.3에 제시하였다. 제 4 장의 끝에서 설명한 바와 같이 P1'-P3'의 추가 판측이 실시되지 않은 경우에 대해서는 Table 5.3에 이들의 값이 빠져 있다. 표에 제시된 파압은 각 설치점에서의 최대값이다. 아울러, 케이슨 주변의 파압분포를 Goda식과 비교하여 Figs. 5.3 - 5.7과 같이 나타내었다. 그림에서 전면벽과 저면에 작용하는 파압 공히, 유공케이슨이 무공케이슨의 경우보다 작게 나타남을 볼 수

Table 5.2 Characteristics of maximum wave pressure acting on the solid-wall caisson.

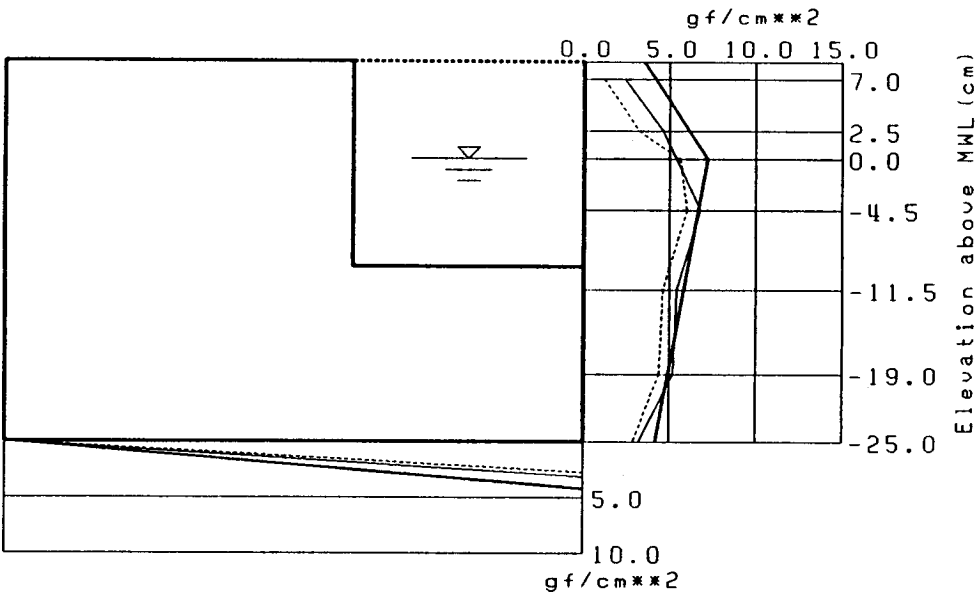
T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1.0	12.2	2.8	4.8	5.7	5.6	5.6	3.4	
	11.0	2.4	4.6	6.8	5.4	5.2	3.0	
	9.5	2.1	4.5	6.7	5.4	5.1	3.0	
	8.5	1.0	3.6	5.7	4.1	4.1	2.3	
	5.5		2.4	4.2	3.2	2.9	1.6	
1.2	14.5	4.4	6.4	9.0	8.2	8.2	5.4	1.0
	12.0	3.6	6.0	8.3	7.0	7.0	4.4	
	9.0	2.2	5.1	6.3	5.7	5.6	3.6	
	6.2		2.8	4.7	3.9	3.8	2.4	
1.4	14.5	5.2	7.6	9.6	9.0	9.0	6.0	1.0
	11.5	3.2	6.4	8.2	7.0	7.0	4.8	
	9.5	1.8	5.1	7.2	6.2	6.2	4.2	
	7.5	0.7	3.8	5.9	4.9	4.9	3.4	
	5.5		2.2	4.4	3.8	3.8	2.6	
1.6	14.5	5.4	8.4	10.2	9.3	9.6	6.6	
	11.5	3.6	6.8	8.8	7.8	7.8	5.6	
	9.0	2.0	5.1	7.1	6.3	6.3	4.4	
	6.5		3.0	5.4	4.7	4.7	3.5	
	5.5		2.2	4.1	4.0	4.1	2.9	
1.8	15.0	7.2	9.3	12.1	10.5	10.5	7.2	1.2
	12.0	4.4	7.6	8.6	8.4	8.4	6.0	
	9.0	2.0	5.4	7.1	6.6	6.6	4.8	
	5.8		2.6	5.0	4.5	4.5	3.4	

Table 5.3 Characteristics of maximum wave pressure acting on the perforated-wall caisson.

T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P1'	P2'	P3'
1.0	12.2	1.2	4.0	5.6	5.0	4.8	3.0	0.0	3.2	2.0	2.6	5.6	3.0	1.8
	11.0	1.2	3.2	6.0	4.6	4.4	2.6	0.0	3.2	2.0	2.0	2.0	3.0	
	9.5	1.8	4.2	5.4	4.8	4.5	2.7	0.0	3.3	2.8	2.3			
1.2	8.5	0.0	2.7	4.7	3.6	3.5	2.1	0.0	2.4	2.0	2.0	4.0	2.0	1.3
	5.5	0.0	1.8	3.7	2.5	2.3	1.5	0.0	1.6	1.7	1.0			
	14.5	3.6	7.2	7.6	6.6	6.8	4.2	4.0	11.2	4.2	5.6	8.0	5.0	2.8
1.4	12.0	2.4	5.6	6.4	5.8	6.0	3.8	3.0	6.4	3.0	4.0	4.2	2.6	1.4
	9.0	1.2	3.6	5.4	4.4	4.5	2.9	0.0	3.6	2.1	2.7			
	6.2	0.0	2.2	4.0	3.0	2.9	1.9	0.0	1.6	1.5	2.2			
1.6	14.5	4.0	6.8	8.8	7.8	8.0	5.4	4.0	8.8	3.8	4.4	9.2	6.0	3.5
	11.5	2.4	6.0	7.4	6.0	6.2	4.2	2.5	6.0	2.8	3.2			
	9.5	0.9	4.2	6.9	5.3	5.4	3.6	1.5	4.5	2.6	2.9	5.2	2.8	1.6
1.8	7.5	0.0	1.6	5.4	4.4	4.3	3.0	0.0	3.0	2.1	2.5			
	5.5	0.0	1.2	3.5	3.2	3.2	2.1	1.5	1.4	1.8	2.0			
	14.5	4.2	7.8	9.9	8.7	8.7	6.0	3.0	8.4	4.5	4.5	10.2	6.8	4.1
1.8	11.5	2.5	5.6	8.3	7.2	7.2	5.0	3.0	5.6	3.6	3.8			
	9.0	0.6	4.0	6.3	5.4	5.6	3.9	1.5	3.3	2.7	3.2			
	6.5	0.0	2.2	4.8	4.1	4.2	2.9	0.0	2.0	2.3	2.7	3.9	2.5	1.5
1.8	5.5	0.0	1.2	4.2	3.5	3.5	2.5	0.0	1.0	2.0	2.4			
	15.0	5.4	10.0	12.5	10.0	9.8	7.5	6.0	9.0	7.5	7.5	12.0	6.5	6.5
	12.0	3.2	6.8	9.2	7.8	7.7	5.6	3.5	4.2	4.2	4.4			
1.9	9.0	0.6	4.5	7.2	6.1	6.2	4.5	2.3	4.2	3.3	3.8	4.6	3.2	1.9
	5.8	0.0	1.8	4.6	3.9	4.0	2.9	1.3	1.8	2.5	2.7			

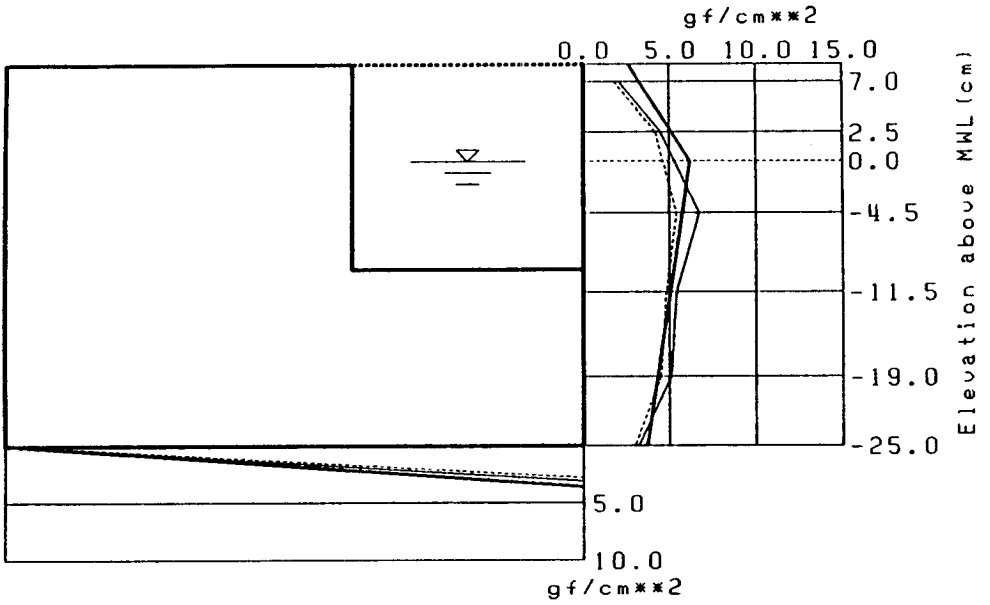


(a) $H_i = 12.2\text{cm}$

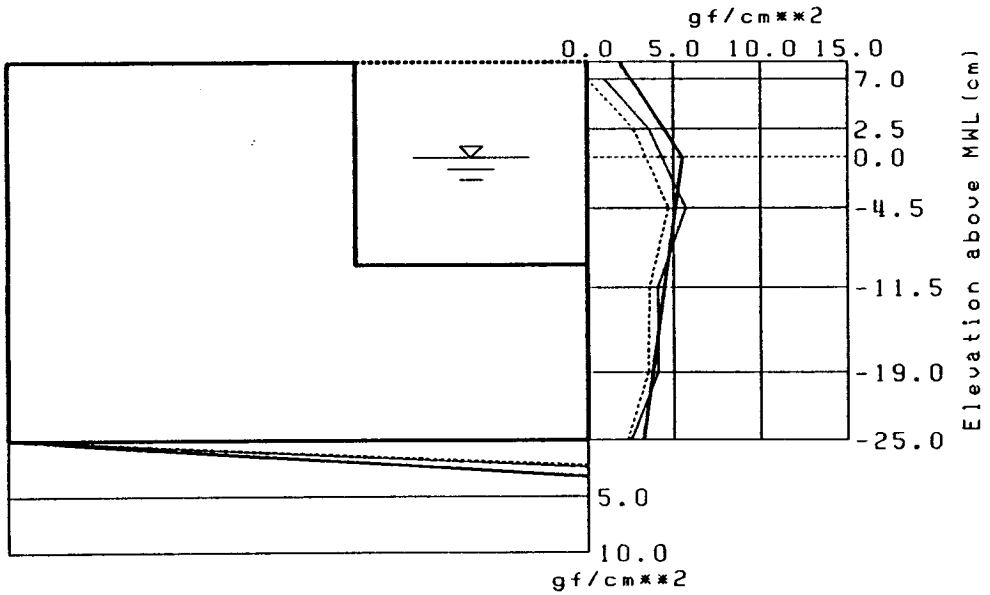


(b) $H_i = 11.0\text{cm}$

Fig. 5.3 Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.0\text{s}$
(thick line : Goda, thin line : solid-wall, dashed line : perforated-wall)

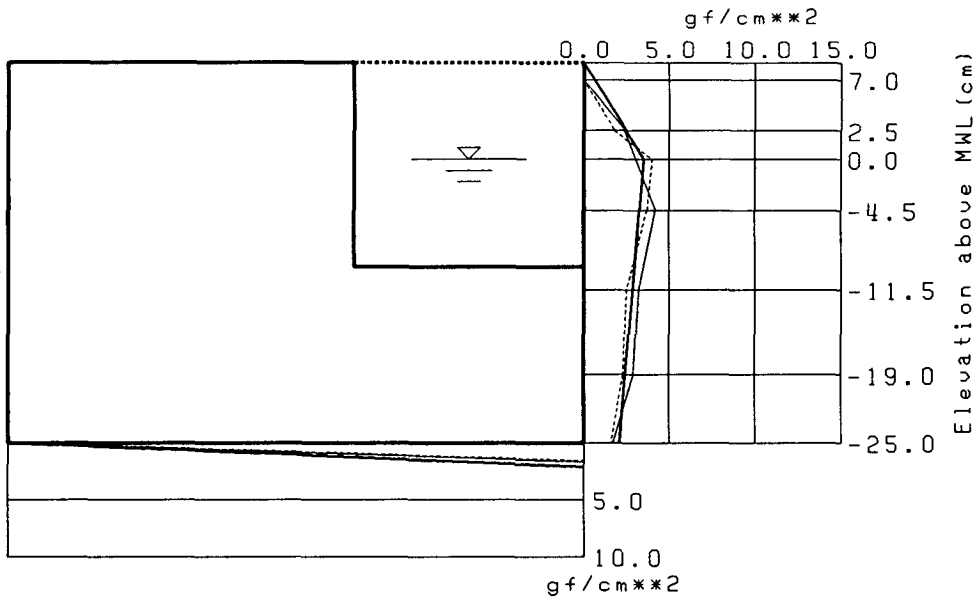


(c) $H_i = 9.5\text{cm}$



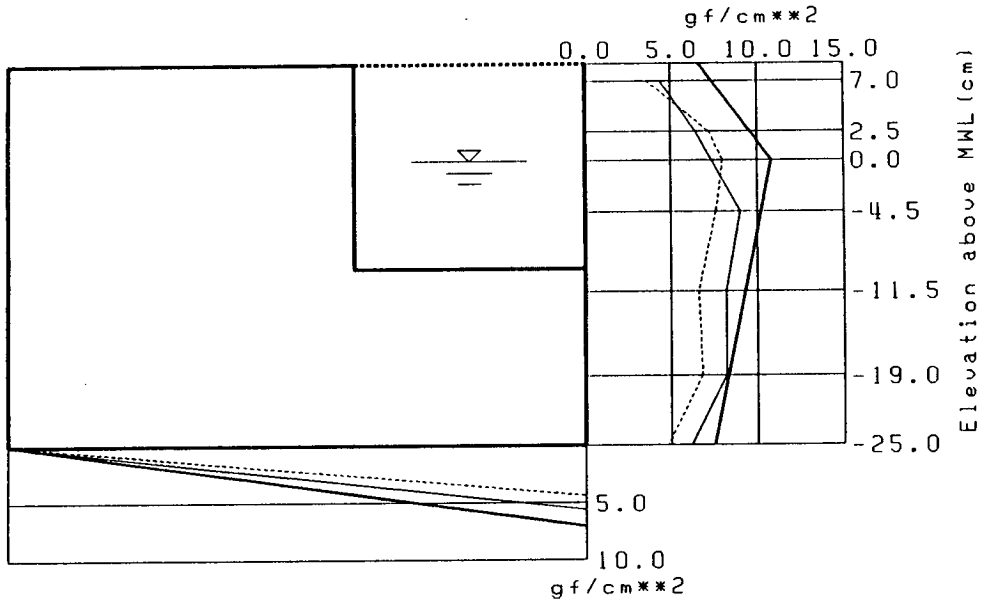
(d) $H_i = 8.5\text{cm}$

Fig. 5.3 (Cont'd).

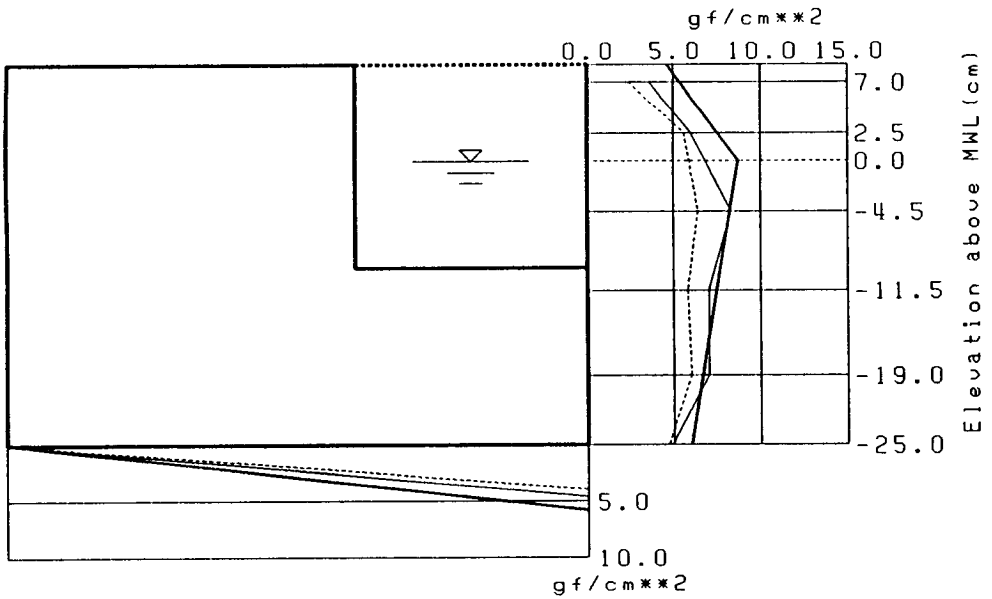


(e) $H_i = 5.5cm$

Fig. 5.3 (Cont'd).

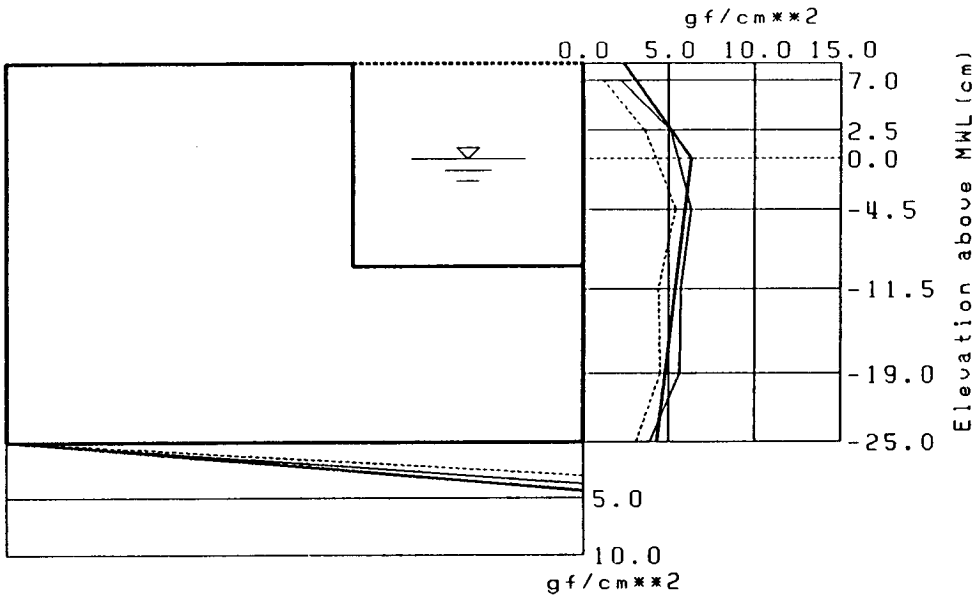


(a) $H_i = 14.5\text{cm}$

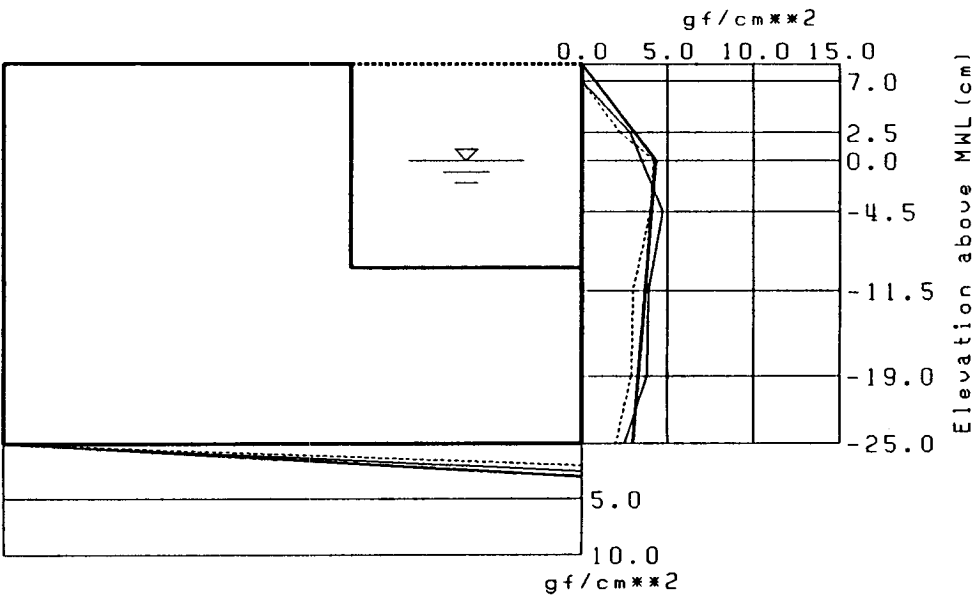


(b) $H_i = 12.0\text{cm}$

Fig. 5.4 Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.2\text{s}$
(thick line : Goda, thin line : solid-wall, dashed line : perforated-wall)

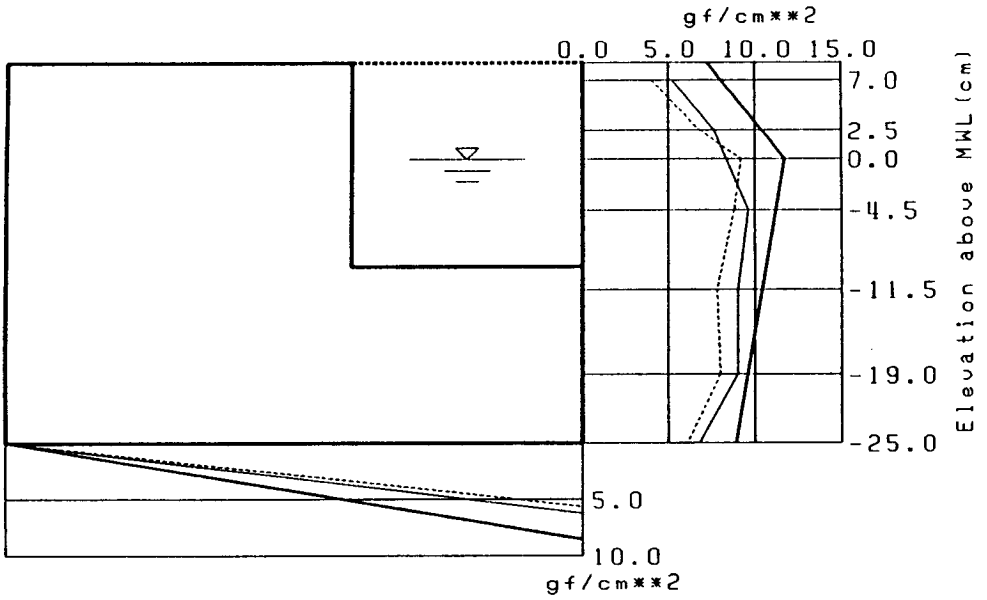


(c) $H_i = 9.0$ cm

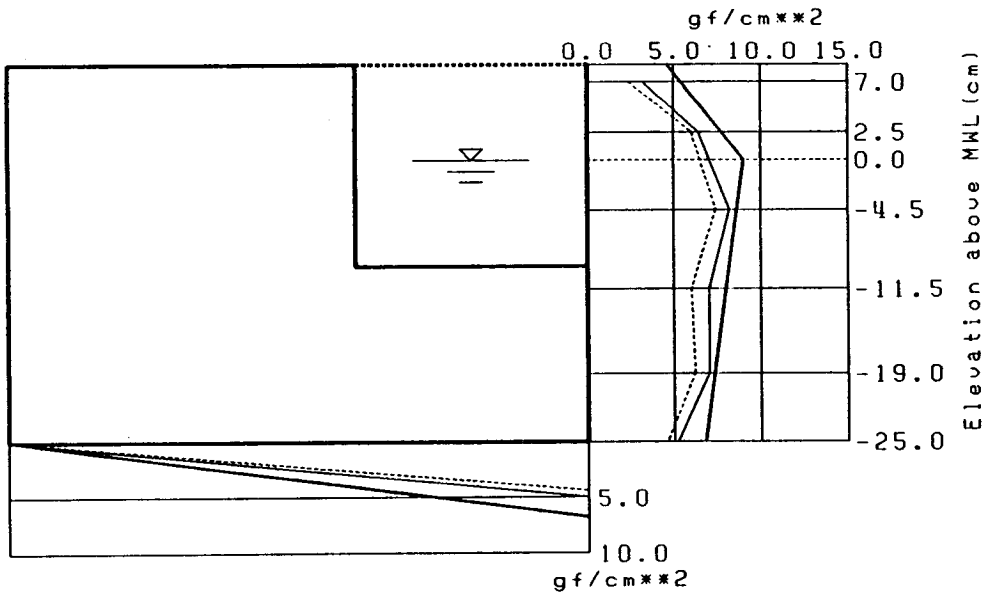


(d) $H_i = 6.2$ cm

Fig. 5.4 (Cont'd).

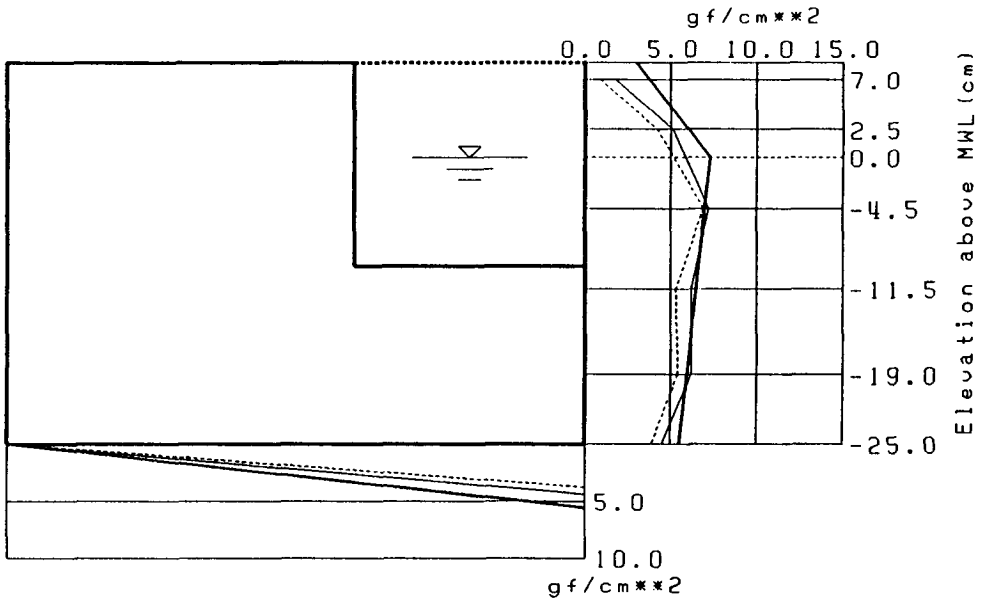


(a) $H_i = 14.5\text{cm}$

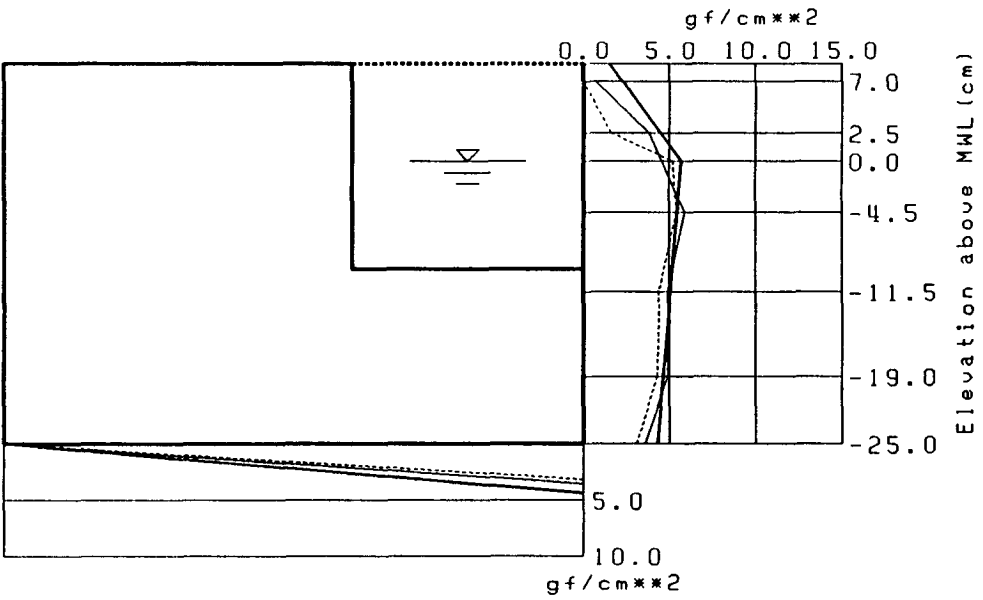


(b) $H_i = 11.5\text{cm}$

Fig. 5.5 Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.4\text{s}$
 (thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall)

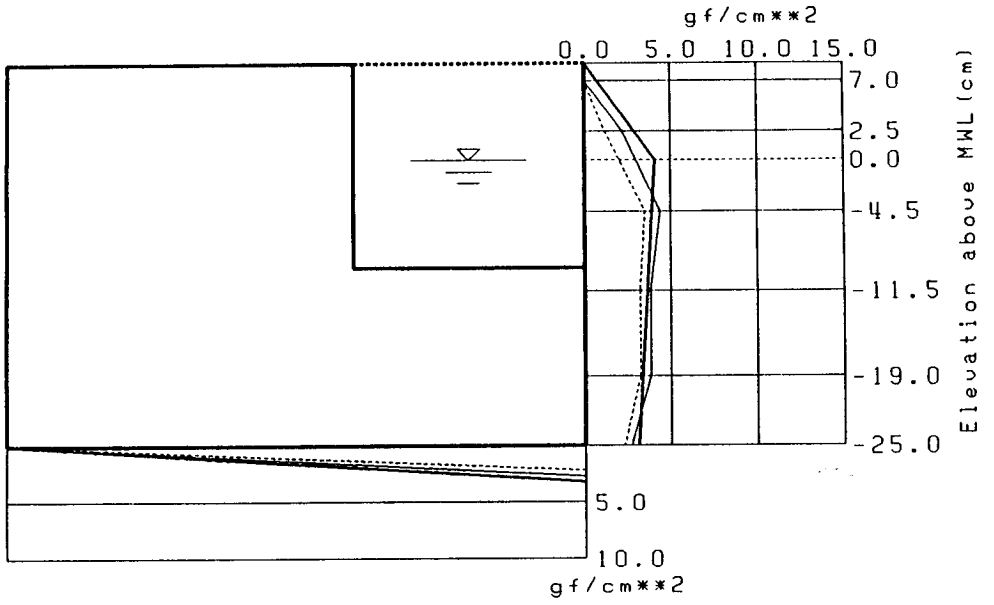


(c) $H_i = 9.5\text{cm}$



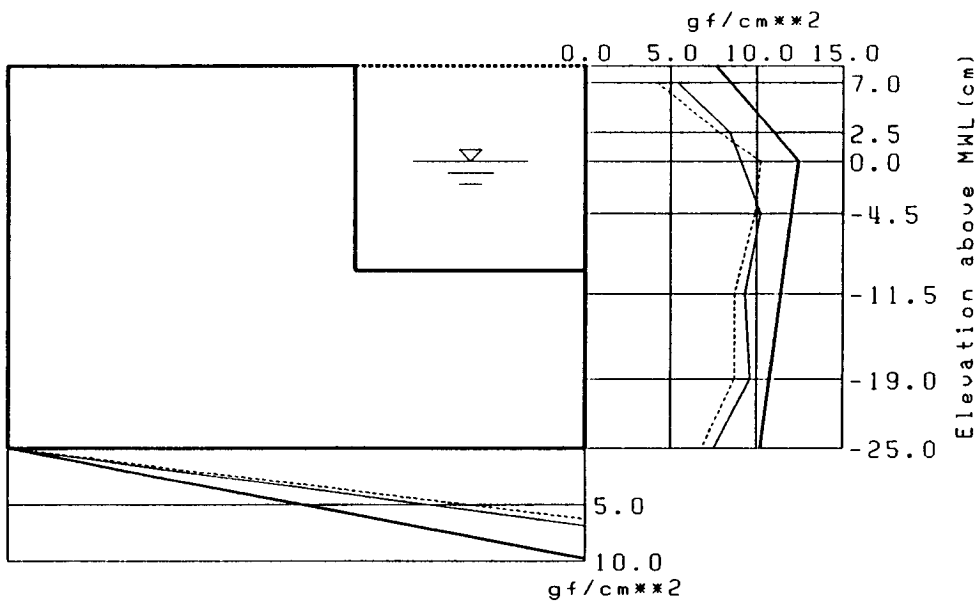
(d) $H_i = 6.5\text{cm}$

Fig. 5.5 (Cont'd).

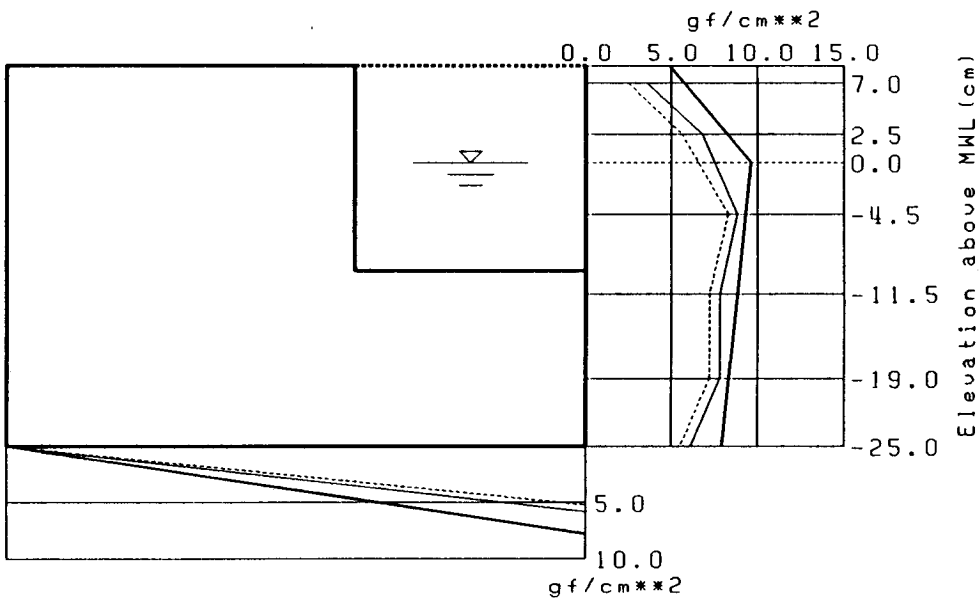


(e) $H_i = 5.5$ cm

Fig. 5.5 (Cont'd).

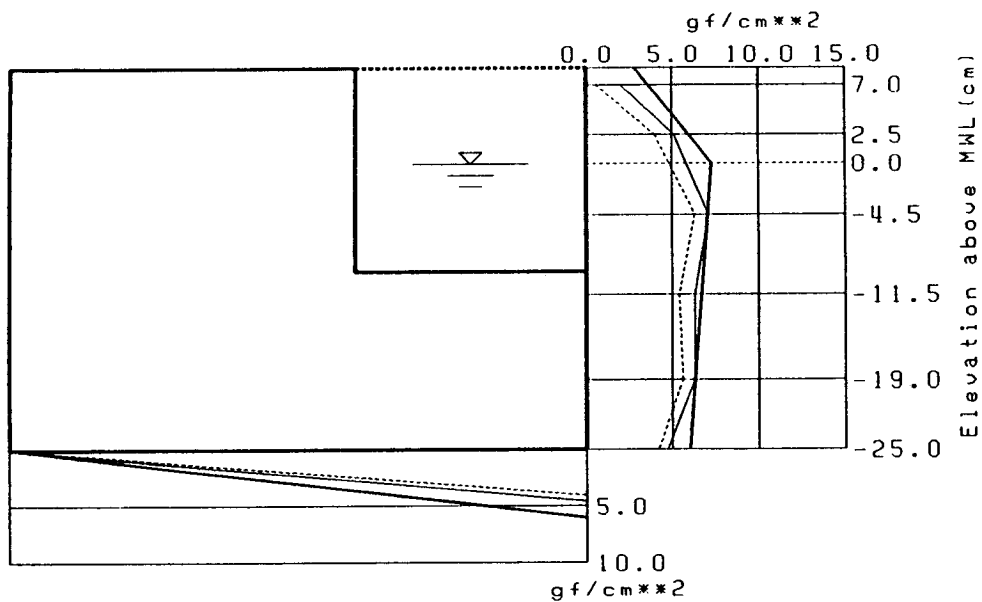


(a) $H_i = 14.5\text{cm}$

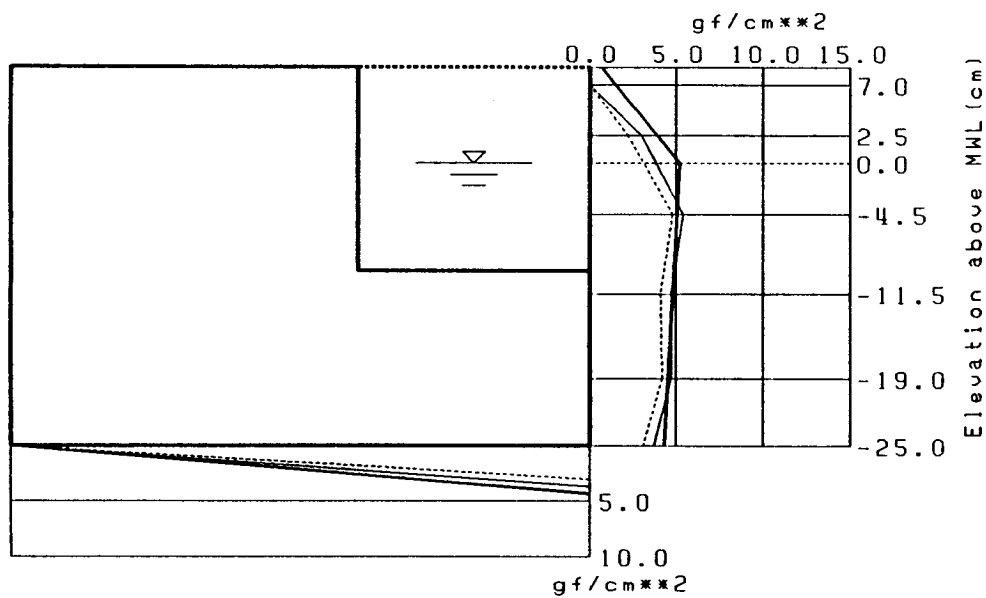


(b) $H_i = 11.5\text{cm}$

Fig. 5.6 Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.6\text{s}$
(thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall)

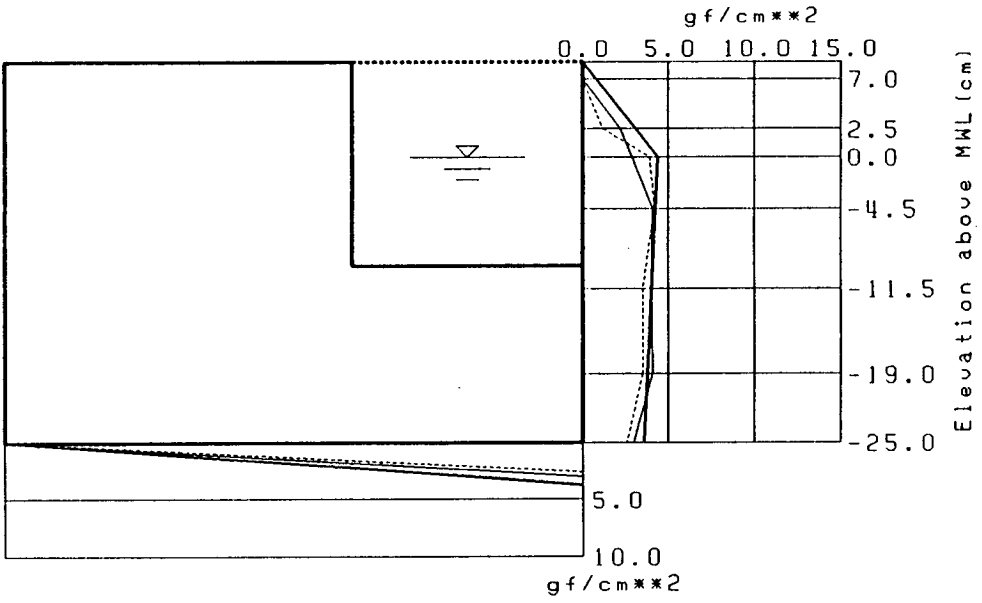


(c) $H_i = 9.0$ cm



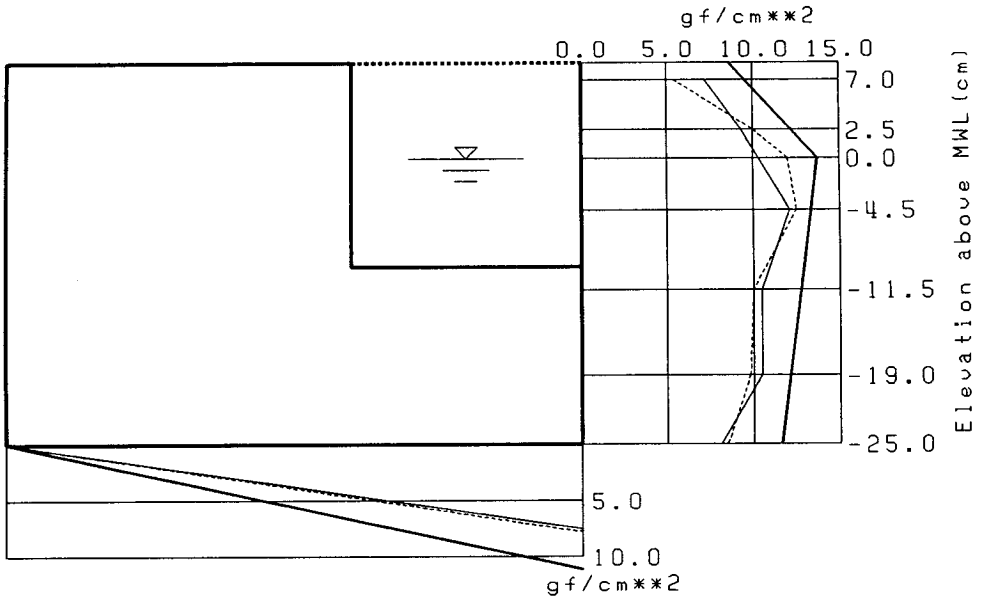
(d) $H_i = 6.5$ cm

Fig. 5.6 (Cont'd).

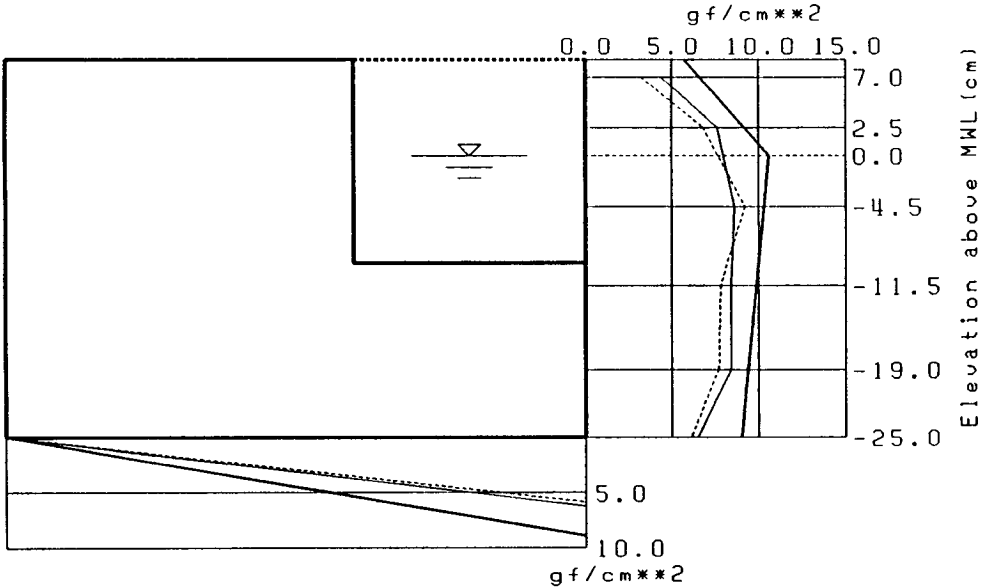


(e) $H_i = 5.5\text{cm}$

Fig. 5.6 (Cont'd).

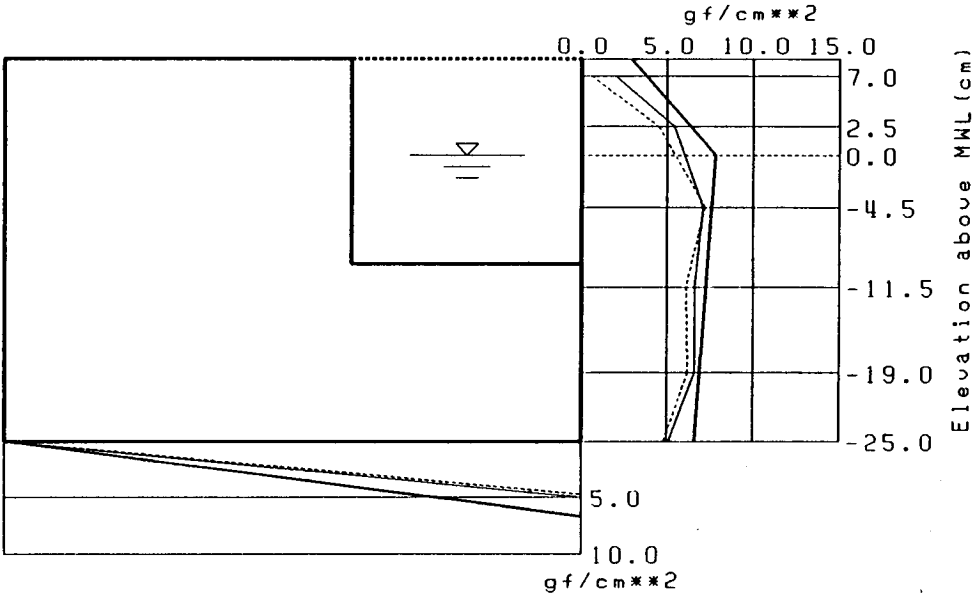


(a) $H_i = 15.0\text{cm}$

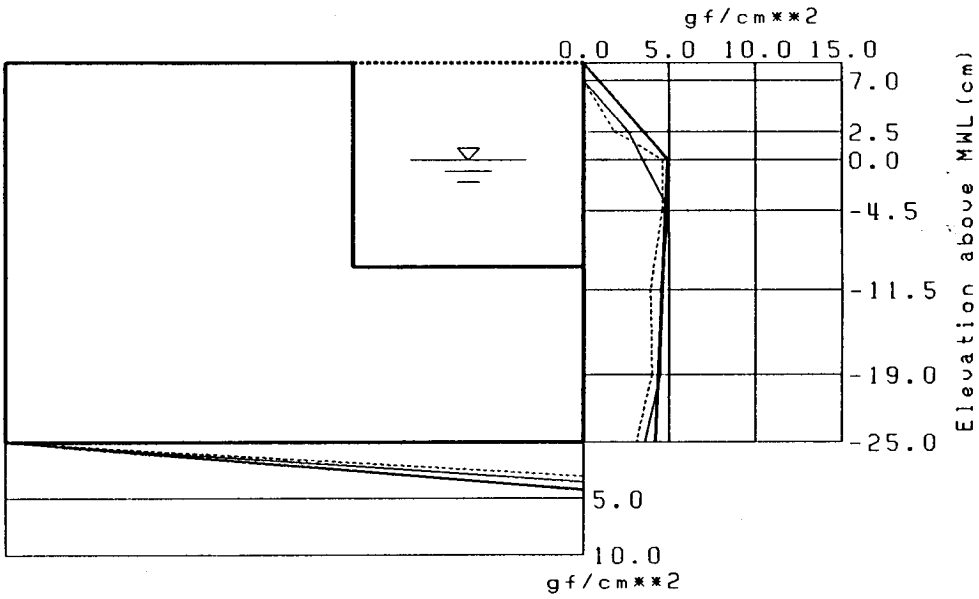


(b) $H_i = 12.0\text{cm}$

Fig. 5.7 Distribution of wave pressure on the caisson for wave period $T=1.8\text{s}$
(thick line : Goda, thin line: solid-wall, dashed line : perforated-wall)



(c) $H_i = 9.0\text{cm}$



(d) $H_i = 5.8\text{cm}$

Fig. 5.7 (Cont'd).

있는데 이는 유공벽 및 유수실에 의한 에너지 消散에 기인된 것으로 사료된다. 또한, 파고가 클수록 실험파압 분포가 Goda식에서 멀어지며 전반적으로 Goda식보다 작게 나타남을 알 수 있다. Goda(1985)에 의하면 천단고가 아주 낮아 월파가 심한 경우, 케이슨 저면에 작용하는 揚壓力은 Goda 공식에 비해 작게 나타난다. 그러나 월파가 케이슨 전면의 파압에 미치는 영향에 대해서는 언급이 없으며 차후 天端高를 변화시켜 가면서 이러한 영향을 검토할 수 있는 실험을 수행할 필요가 있을 것이다.

무공케이슨의 전면벽의 파압자료의 時系列을 그려서 관찰하여 보면 전 실험파랑에 대하여 충격파가 발생하지 않았다. 유공케이슨의 경우, 전면파압은 무공케이슨에 비해 감소하는 경향을 보이거나 유수실 후면벽에 衝擊波의 형태를 갖는 파압이 관측되었다. 충격파의 강도는 입사파랑의 파형경사가 증가할수록 커짐이 관찰되었으며 이는 파형경사의 증가에 따른 월파 및 파랑이 slit를 통과할 때 氣泡를 포함하는 제트류가 발생되어 유수실 후면벽에 부딪치는 현상에 기인된 것으로 판단된다. Fig. 5.8은 본 실험에서 관측된 유수실 후면벽에서의 충격파압의 일예를 보여준다. 이 충격파는 비디오 촬영결과를 분석해 보면 slit를 통과한 파가 氣泡를 포함하면서 후면벽에 충돌할 때 기포가 터져서 발생하는 것으로 제 3 장에서 정의하였던 3가지 衝擊波 중의 어느 하나에도 속하지 않는 것으로 사료되어 충격파로 보기는 어려우며 차후에 이에 대한 연구가 수행되어야 한다.

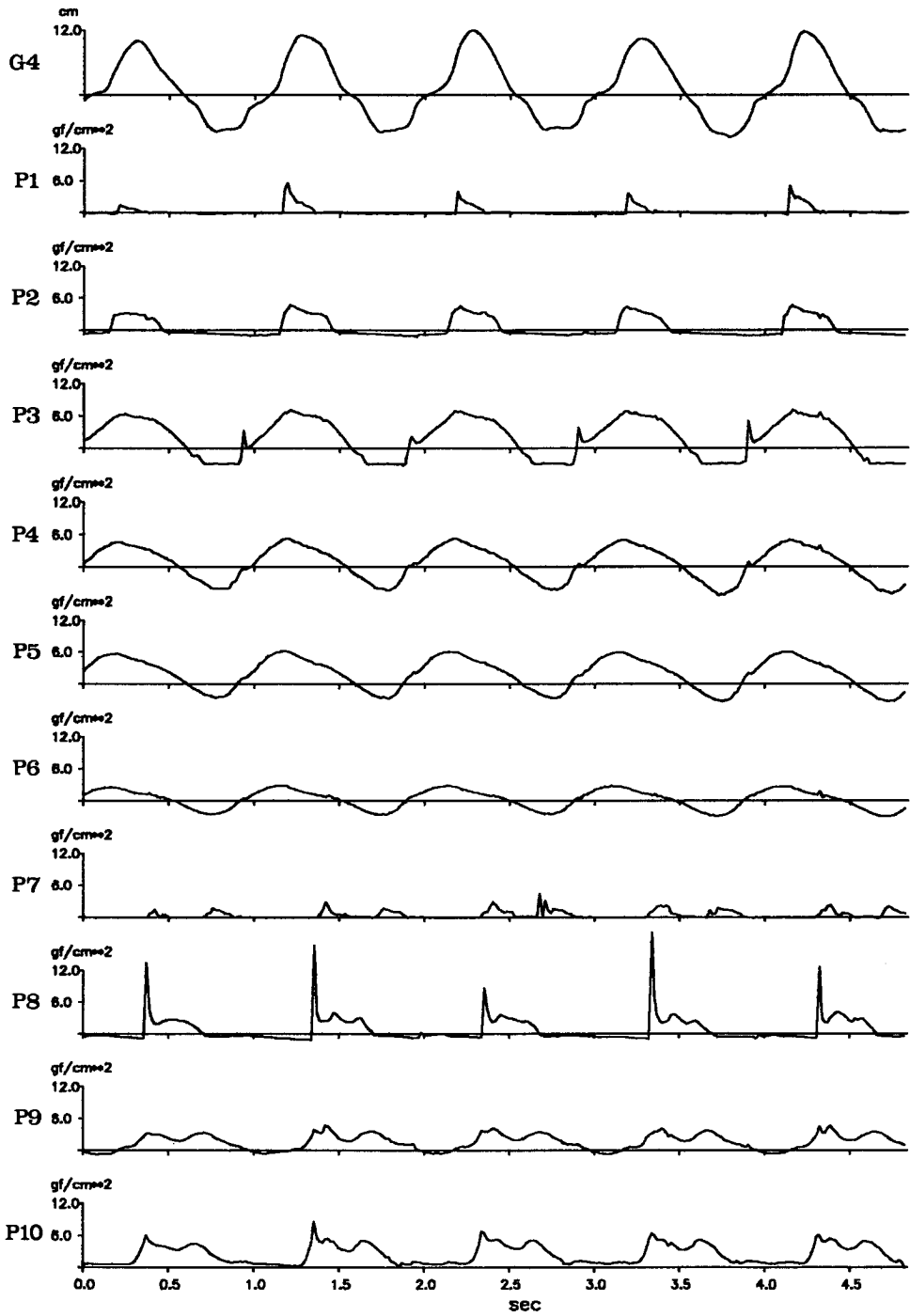


Fig. 5.8 Example of shock pressure ($T=1.0s$, $H=12.2cm$)

2.2 유공케이스에 작용하는 파압분포의 시간적 변화

Takahashi(1991)는 有孔防波堤에 작용하는 파랑 및 파력의 특성을 Fig. 2.5 및 2.6에 나타낸 바와 같이 여섯 단계로 나누어 분석하였다. 본 연구에서는 이중 Crest IIa 및 Trough III을 제외한 다음과 같은 4개의 위상에 대해서 케이스의 각 부분에 작용하는 파압의 시간적 변화를 고찰하였다.

Phase I : 有孔壁 전면에 最大正壓 작용시

Phase II : 遊水室 후면벽에 最大正壓 작용시

Phase III : 유공벽 후면에 最大正壓 작용시

Phase IV : 유공벽 전면에 最大負壓 작용시

일례로 Table 5.4에는 주기 1.0초, 파고 5.5cm 및 주기 1.8초, 파고 15.0cm에 대한 각 위상별 파압분포가 제시되어 있으며 Fig. 5.9 및 5.10에 이를 그림으로 표시하였다. 유수실 후면벽은 파압을 정수면 위의 한 점에서만 관측하였기 때문에 파압분포를 그리기가 어려워 관측점에서의 파압만을 화살표로 표시하였다. 또한, 파압의 크기가 아주 작아 화살표를 그리기가 어려운 경우에는 파압의 작용방향을 나타내기 위하여 화살표의 길이를 관측치보다 길게 하였다. 한편, Photo 5.1은 주기 1.8초, 파고 15cm의 경우 각 위상에 대한 파랑의 작용상황을 보여준다.

유공벽 전면에 최대파압이 작용하는 Phase I에서는 주기 1.0초와 1.8초의 파압특성이 큰 차이가 없이 유수실 내부와 케이스 저면에 모두 正壓이 작용하였다. 遊水室 後面壁에 작용하는 파압은 1.8초의 경우 관측이 되었으나 1.0초의 경우는 파고가 작아서 정수면 보다 위에 설치된 파압계에 의해 관측되지 않았는데 유수실 바닥면이 水位上昇에 의한 정압으로 작용하였기 때문에 유수실 후면벽에도 정압이 작용하였을 것으로 생각된다.

Table 5.4 Characteristics of wave pressure acting on the perforated-wall caisson for different phases.

PHASE 1

T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P1'	P2'	P3'
1.0	5.5	0.0	1.8	3.7	2.5	2.3	1.5	0.0	0.0	0.8	0.5	4.0	0.6	0.5
1.8	15.0	5.4	10.0	12.5	10.0	9.8	7.5	0.0	5.0	2.5	5.0	12.0	2.8	3.0

PHASE 2

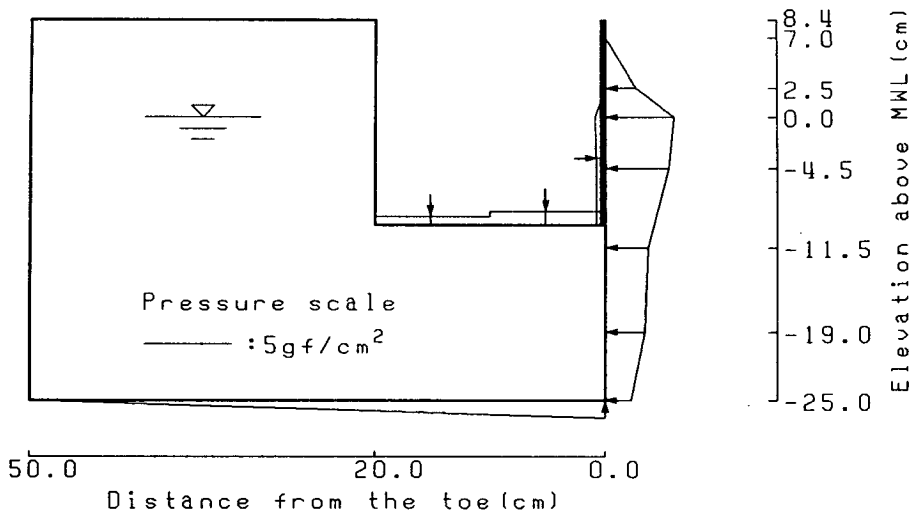
T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P1'	P2'	P3'
1.0	5.5	0.0	0.0	0.0	-1.7	-0.7	-0.5	0.0	1.6	0.6	1.0	0.0	0.5	0.4
1.8	15.0	5.4	7.5	11.0	8.5	8.5	6.5	1.8	9.0	7.5	7.5	10.0	6.5	6.5

PHASE 3

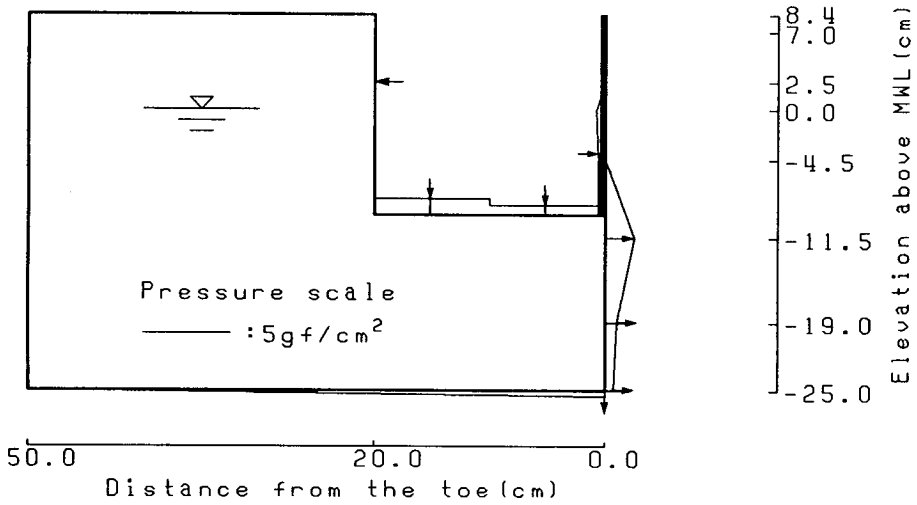
T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P1'	P2'	P3'
1.0	5.5	0.0	0.0	-3.7	-2.5	-2.3	-1.7	0.0	0.0	1.7	1.0	0.0	2.0	1.3
1.8	15.0	3.0	6.6	10.0	7.0	7.5	5.8	6.0	8.0	7.0	7.5	8.0	6.5	6.5

PHASE 4

T(s)	Hi(cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P1'	P2'	P3'
1.0	5.5	0.0	0.0	-3.7	-2.5	-2.3	-1.7	0.0	0.0	1.7	1.0	0.0	2.0	1.3
1.8	15.0	0.0	0.0	-4.0	-8.5	-8.5	-6.3	0.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	0.0	-2.0

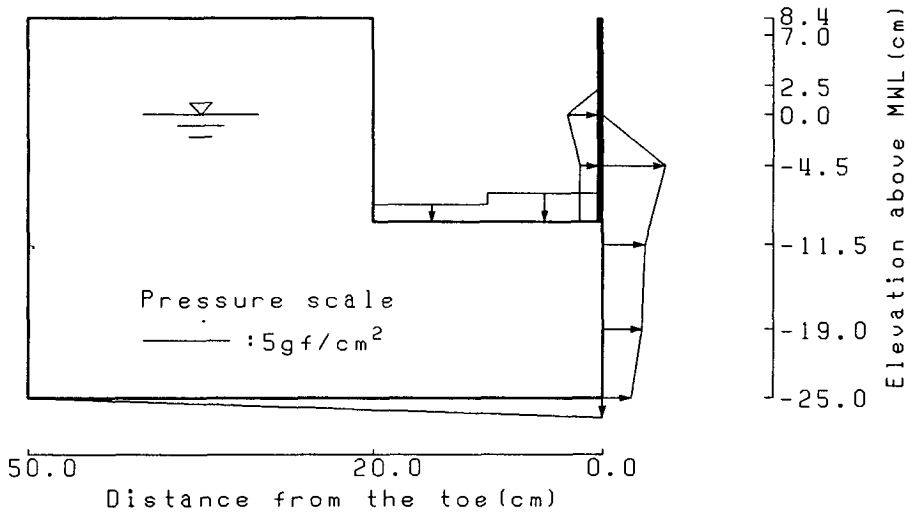


(a) Phase I

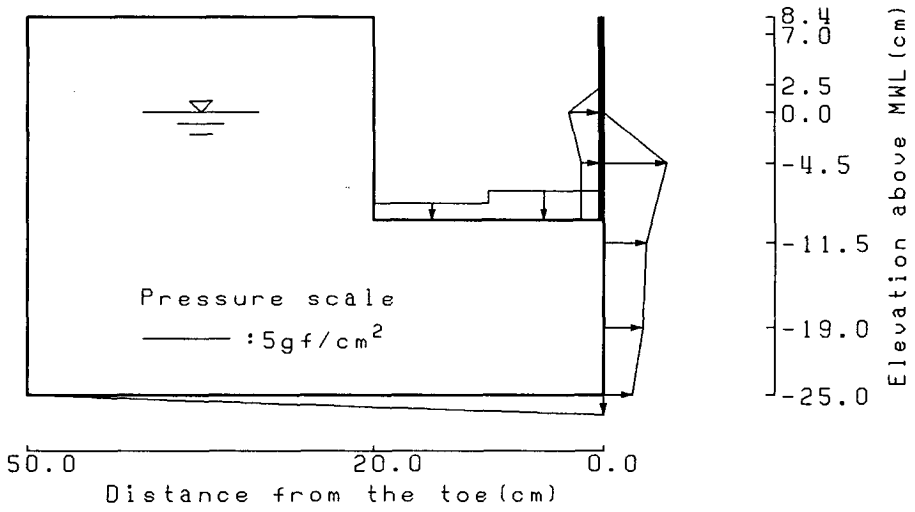


(b) Phase II

Fig. 5.9 Distribution of wave pressure on the perforated-wall caisson
 ($T=1.0\text{s}$, $H=5.5\text{cm}$)

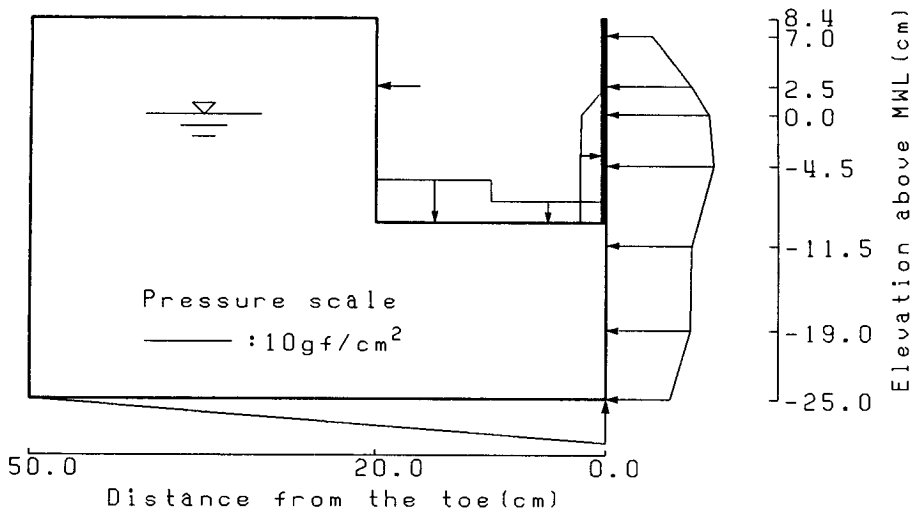


(c) Phase III

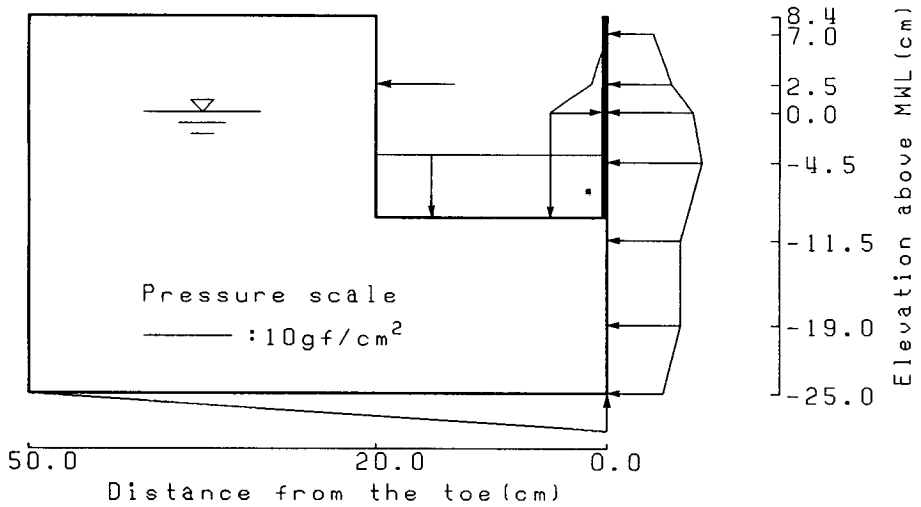


(d) Phase IV

Fig. 5.9 (Cont'd).

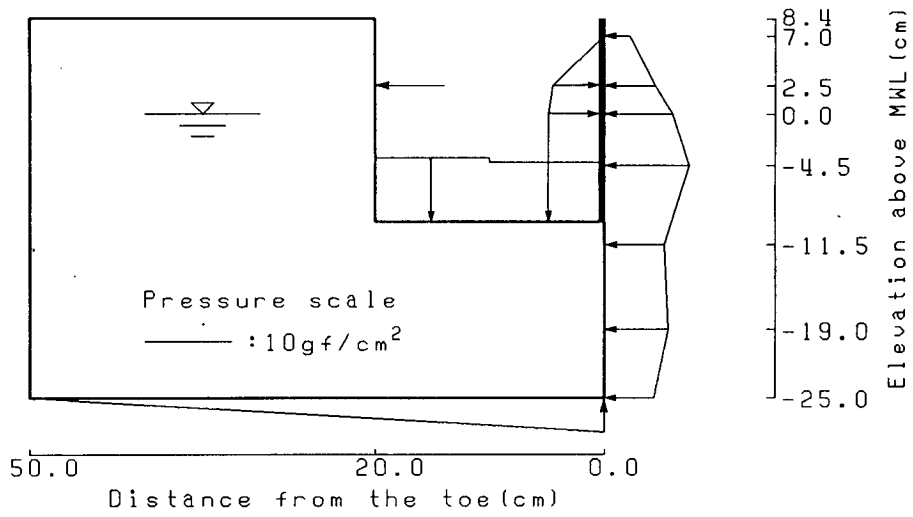


(a) Phase I

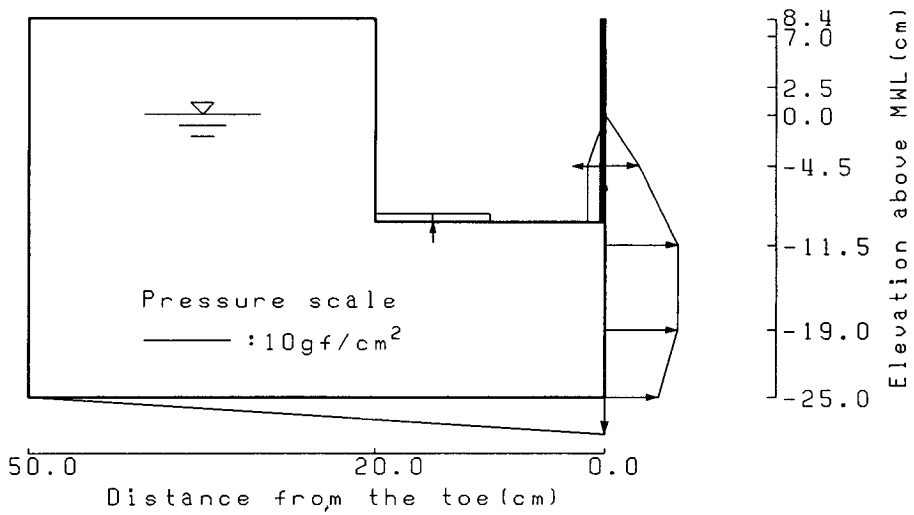


(b) Phase II

Fig. 5.10 Distribution of wave pressure on the perforated-wall caisson
 (T=1.8s, H=15.0cm)

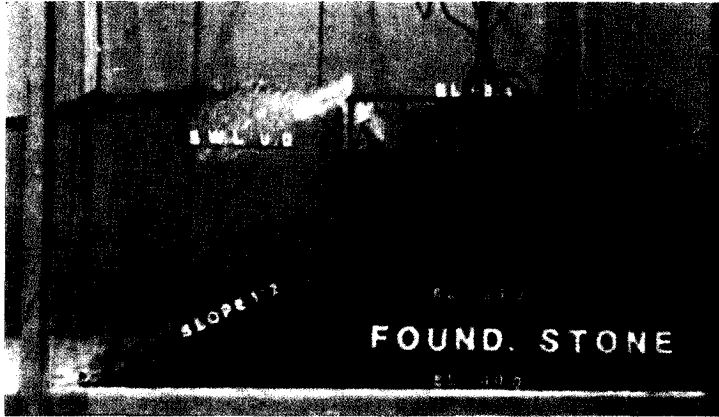


(c) Phase III

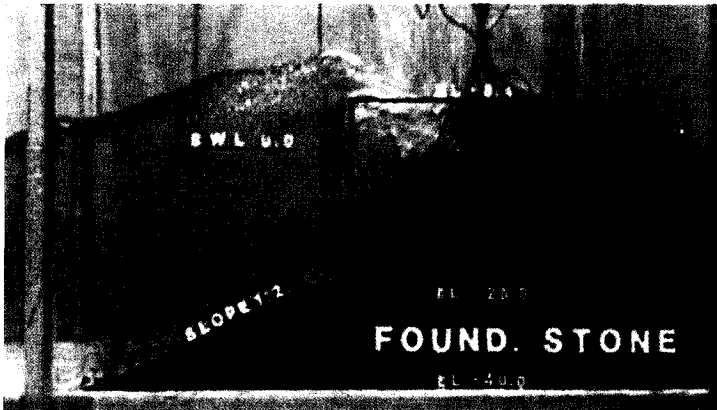


(d) Phase IV

Fig. 5.10 (Cont'd)

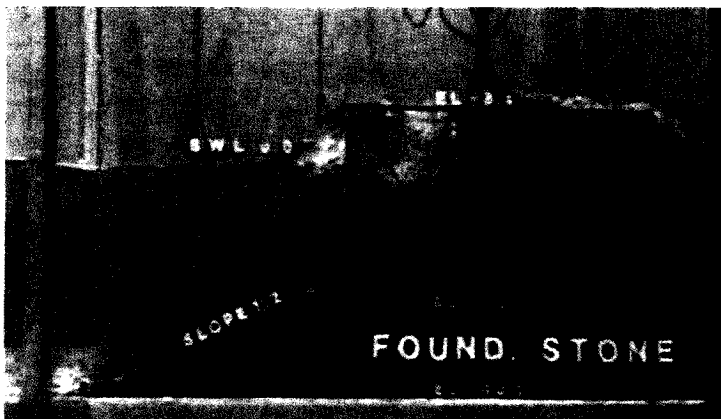


(a) Phase I

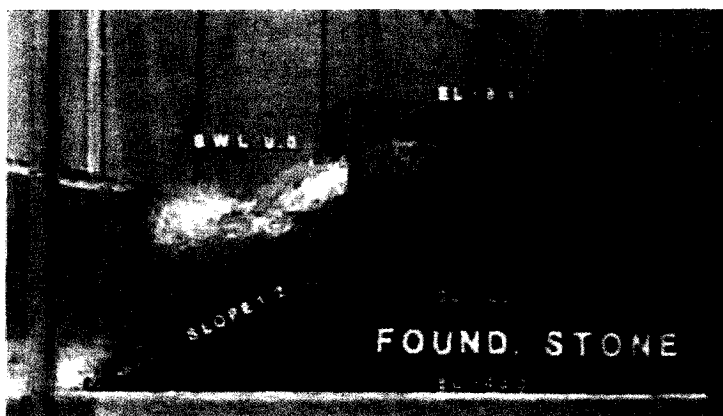


(b) Phase II

Photo 5.1 Wave patterns on a perforated-wall caisson for different phases
($T=1.8\text{sec}$, $H=15.0\text{cm}$)



(c) Phase III



(d) Phase IV

Photo 5.1 (Cont'd)

유수실 후면벽에 최대과압이 작용하는 Phase II에서는 두 주기간에 현저한 차이가 발생한다. 즉, 단주기인 1.0초의 경우는 유수실 후면벽에 최대과압이 발생할 시점에 유공벽 전면에서는 이미 수위가 靜水面 이하로 내려가기 시작하기 때문에 유공벽 전면과 케이슨 저면에 負壓이 발생하나 장주기인 1.8초의 경우에는 波峰을 조금밖에 지나지 않은 시점이라 유공벽 전면과 케이슨 저면에 정압이 발생한다. 그러나 유수실 내부는 모두 정압으로서 이는 주기 1.0초의 경우 有孔壁 前面의 수위가 하강하더라도 유수실 내부의 수위가 즉시 떨어지지 않기 때문이다.

유공벽 후면에 최대과압이 작용하는 Phase III에서는 1.8초의 경우 Phase II에서와 비슷한 양상을 보이는데 이는 둘 사이에 시차가 거의 없기 때문이다. 즉, 유공벽 후면과 유수실 후면벽에 걸리는 최대과압은 유수실 내부의 水位上昇에 주로 기인하기 때문이다. 그러나 1.0초의 경우는 유공벽 전면의 수위가 하강하면서 유공벽 후면에 최대과압이 작용하는데 이 때문에 유공벽 전면의 負壓은 더욱 증가하였으나 이 때에도 유수실 내부의 수위는 정수면 아래로 내려가지 않았다.

유공벽 전면에 最大負壓이 작용하는 Phase IV에서는 1.0초의 경우 Phase III과 시점이 일치하여 같은 값을 나타내며 1.8초의 경우는 유수실 내부와 유공벽 전면 및 케이슨 저면에 모두 부압이 작용하였다.

제 6 장 結論 및 차후 研究計劃

제 1 절 結論

혼성방파제의 케이슨을 설계하기 위하여 이에 작용하는 파압을 계산하는 데 많이 사용되어 온 공식들을 정리하여 이들의 적용범위, 문제점 등에 대한 고찰을 시도하였다. 또한 기존의 파압계산 공식들만으로는 예측이 불가능한 충격파에 대한 현재까지의 연구결과를 요약·정리하여 衝擊波의 發生原因, 特性 및 解析方法 등을 파악하였다.

지금까지 거의 모든 국내 주요항만의 방파제에 사용된 직립 무공케이슨과 방파제 외해측에서의 반사에 의한 파고 증가를 억제할 목적으로 최근 부산 인공섬 외곽방파제 등에 채택 가능성이 있는 유공케이슨의 성능에 대한 정량적인 비교·분석을 위하여 반사율, 전달율, 케이슨 전면에서의 쳐올림 높이 등 일반적인 水理特性과 케이슨에 작용하는 波壓分布特性 등을 포함하는 수리모형실험을 파랑조건이 다른 여러 개의 規則波를 대상으로 실시하였다.

실험결과 反射率은 유공케이슨이 무공케이슨에 비해 波浪條件에 따라 약 27 - 35% 작은 것으로 나타났으며, 傳達率, 쳐올림 높이 등도 유공케이슨이 무공케이슨에 비해 작게 나타나 전체적인 수리특성 면에서 유공케이슨이 무공케이슨보다 유리함을 알 수 있다.

케이슨 전면에서의 최대파압과 저면의 양압력만을 비교한 결과 역시 유공케이슨이 무공케이슨에 비해 유리함을 확인하였다. 그러나 유공케이슨의 경우 유수실 내에도(遊水室 後面壁 및 底面, 有孔壁 後面) 파압이 작용하므로 무공케이슨과의 우열을

정확히 비교하기 위해서는 유수실 내의 파압을 세밀히 관측할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 현재 보유하고 있는 波壓計의 數가 부족하여 이러한 목적을 위한 精密觀測을 실시할 수는 없었다.

유공케이슨의 경우 케이슨 전면과 유수실 내의 파압은 시차를 가지고 작용하기 때문에 파랑이 작용하는 위상에 따라 파압분포가 달라진다. 이러한 특성을 파악하기 위하여 파랑의 한 주기를 4개의 位相으로 나누어 각 위상별 파압분포를 분석·검토하였으며 파압계의 부족으로 인하여 정확한 분석은 어려웠으나 결론적으로 말하면 유공케이슨의 형상 및 작용하는 파랑의 특성에 따라 파압분포특성이 달라지므로 水理模型實驗을 실시하여 그 특성을 파악해야 한다.

제 2 절 차후 연구계획

케이슨 전면의 파압 및 저면에서의 양압력은 파고가 증가할수록(즉, 월파량이 많아질수록) 실험결과와 Goda 식과의 차이가 커져서 실험치가 전반적으로 Goda 식보다 작게 나타남을 알 수 있었다. Goda(1985)에 의하면 천단고가 낮아 월파가 심한 경우, 케이슨 저면에 작용하는 양압력은 Goda 공식에 비해 작게 나타난다. 그러나 越波가 케이슨 전면의 파압에 미치는 영향에 대해서는 언급이 없으며 차후 天端高 및 波高를 동시에 변화시켜 가면서 실험을 실시하여 越波量의 변화가 케이슨 전면파압에 미치는 영향을 좀더 면밀히 검토할 필요가 있을 것이다.

유공케이슨의 유수실 내에서 平均水位가 다소 상승하는 현상과 동시에 共振現象으로 인하여 有孔壁 後面과 遊水室 後面壁에서는 수위가 크게 上昇하고 유수실 중앙에서는 수위가 下降하는 현상이 육안으로 관찰되었다. 유수실 내의 파압은 수위와도 밀접한 관계가 있을 것이므로 차후 연구에서는 유수실 내에서도 유공벽 후면, 유수실 중앙 및

유수실 후면벽 등 3개 지점 정도에서 수위의 변화를 관측하여 이를 과압관측자료와 비교하여 검토할 필요가 있을 것이다. 또한 유수실 내에 금번 실험보다 더 많은 과압계를 설치하여 유수실 내에서의 과압의 변화를 좀더 정밀히 관측할 필요가 있다.

본 연구에서는 정밀분석이 이루어지지 않았지만 주기가 작고($T = 1.0$ 및 1.2 초) 波形傾斜가 큰 경우 遊水室 後面壁에 衝擊波의 형태를 갖는 과압이 관측되었다. 차후 연구에서는 과량조건, 수심, 마운드 및 유수실의 형상등에 따른 충격파 발생조건과 양상을 파악할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌 (References)

- 부산직할시. (1992). "해상신도시 외곽방파제 기본설계용역 보고서. 수리모형실험-II편 (단면안정성실험)."
- Bagnold, R.A. (1939). "Interim report on wave pressure research." J. of Inst. of Civil Engrg., 12, 201-226.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1991). "Hydraulic design of perforated breakwaters". J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, 118(1) 1-14.
- Goda, Y. (1974). "A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwater." Proc. 14th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1702-1720.
- Goda, Y. (1985). "Random seas and design of maritime structures". Univ. of Tokyo Press.
- Hiroi, I. (1919). "On a method of estimating the force of waves." Memoirs of Engrg. Faculty, Imperial Univ. Tokyo, X(1), 19.
- Jarlan, G.E. (1961). "A perforated vertical wall breakwater." The Dock and Harbour Authority, XII(486), 394-398.
- Jensen, O.J. (1984). "A monograph on rubble mound breakwaters." Danish Hydraulic Inst.
- Lundgren, H. (1969). "Wave shock forces: An analysis of deformation and forces in the wave and in the foundation." Proc. Symp. Research on Wave Action, Delft, Vol. 2, Paper 4.
- Mansard, E.P.D and E.R. Funke. (1980). "The Measurement of Incident and Reflected Spectra using Least Square Method." Proc. 17th Coastal Eng. Conf., 191-206.
- Mitsuyasu, H. (1966). "Shock pressure of breaking wave." Proc. of 10th Coastal Engrg. Conf., ASCE, 268-283.

- Quinn, A. De F. (1961). "Design and Construction of Ports and Marine Structures." McGraw-Hill, New York.
- Takahashi, S. (1991). "Design method of perforated wall caissons." Personal Memo. Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Suzumura, S. (1983). "Generation mechanism of impulsive pressure by breaking wave on a vertical wall." Rep. of Port and Harbour Res. Inst., 22(4), 3-31 (in Japanese).
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Miyanaga, S. (1985). "Uplift wave forces due to compression of enclosed air layer and their similitude law." Coastal Eng. in Japan, 28, 191-206.
- Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S. and Goda, Y. (1976a). "An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters." Proc. 23rd Japanese Conf. Coast. Engrg., 11-16 (in Japanese).
- Tanimoto, K. et al. (1976b). "An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and seawalls." Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst., No. 246, 38p. (in Japanese)
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kitatani, T. (1981). "Experimental study of impact breaking wave forces on a vertical-wall caisson of composite breakwater." Rep. of Port and Harbour Res. Inst., 20(2), 3-39 (in Japanese).