

# 防波堤구조와 水理特性 ②

## ● 日本의 防波堤 設計技術 현황

日本 港灣技術研究所

Katsutoshi Tanimoto (수공부 방파제연구실장)

Shigeo Takahashi (수공부 波에너지연구실장)

Katsutoshi Kimura (수공부 방파제연구실)

### 3. 파력을 이용한 방파제 구조

a) 직립벽

해수를 차단하기 위한 벽길이는 가장 짧으나 중력식 구조인 경우에는 파력에 충분히 견딜 수 있는 중량과 넓이가 필요하다.

#### 3-1 파제벽의 기본형

방파제의 주요기능은 파랑진행을 중지시키는 것이며, 이를 위한 가장 간단한 방법은 견고한 벽으로 해수를 차단하는 것이다.

반사파의 영향은 높으며 앞에서 설명한 것과 같이 수평력은 거의 동등한 높이로 벽에 작용한다.

이 보고서에서는 이러한 기능의 벽을 파제벽으로 호칭하고자 하며 [그림 20]과 같이 4가지 기본형의 기초제원은 방파제 구조에 적용될 수 있다.

b) 경사벽

경사벽은 경사된 수직벽이므로 해수를 차단하는 벽길이는 길어지며 중요한 특징은 파력이 하향인 점이다. 이는 입사파가 벽면에 직

Katsutoshi TANIMOTO · Shigeo TAKAHASHI · Katsutoshi KIMURA

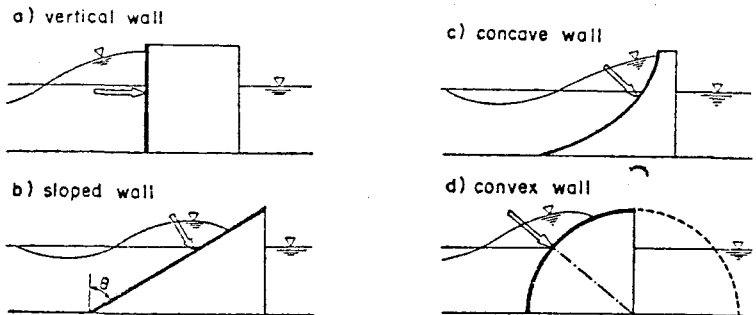


Fig. 20 Basic Shapes of Wave Barrier Wall

각으로 작용하기 때문이다. 따라서 파력에 저항하는 중력식 경사 구조의 안정성은 개선되었으나 벽 높이가 충분하지 못하면 월파와 전달파가 쉽게 발생하는 단점도 있다.

c) 오목벽

오목벽은 경사벽과 비슷한 특성을 지니고 있으며 벽길이는 경사벽보다 짧고 파력의 합성방향은 수평으로 변화한다.

d) 블록벽

블록벽도 경사벽과 비슷한 특성을 가지고 있으며 두드러진 특징은 단면이 반원일 때 나타난다. 이 경우 파랑의 합력은 원의 중심에 작용하며 다른 회전력을 주지 않는다.

위에서 설명한 4가지 파제벽 가운데 일반적으로 직립벽이 직립제와 혼성제의 직립부에 적용되고 있다.

3-2 경사벽 방파제

(1) 경사케이슨

하향의 파력은 경사, 오목, 블록형벽면의 파랑과 접한 면에 작용한다. 하향력은 경사에 저항하는 하중으로 작용하기 때문에 이러한 파제벽은 파력을 저지함으로써 이용효과를 가져온다고 할 수 있으며 전형적인 구조물은 경사면을 가진 케이슨이다.

[그림 20] 2번째 모양의 이상적인 경사벽에 대하여 수직선과의 경사각도를  $\theta$ 라 하고 작용하는 합

성파력  $F_s$ 의 수평 및 수직성분은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} F_H &= F_s \cdot \cos\theta, \\ F_V &= F_s \cdot \sin\theta \end{aligned} \dots\dots\dots(25)$$

이때 각  $\theta$ 를 결정하면 파력의 수평성분은 수직성분에 의한 마찰력과 동등하게 되며 이 각도를  $\theta_0$ 라 한다.

$$\begin{aligned} F_H &= \mu \cdot F_V, \\ \cot \theta_0 &= \mu \end{aligned} \dots\dots\dots(26)$$

$\mu$ : 바닥구조와 기초기반의 마찰계수

$\mu$ 값이 콘크리트와 사석기초의 표준치인 0.6일 때  $\theta_0$ 는 약  $60^\circ$ 이다.

기초 구조물 아래에 작용하는 지반반력만을 가정하면 경사각  $\theta = 60^\circ$ 인 케이슨은 파랑 작용에 의한 경사에 대하여 항상 안정되어 있는 것을 의미한다.

(2) 경사 Top케이슨

구조물 전체높이에 대하여 경사면을 만드는 것은 매우 어려우나 벽전면의 일부분을 경사지게 하는 것은 실질적으로 가능하며 이러한 구조물을 경사 Top케이슨이라 부른다.

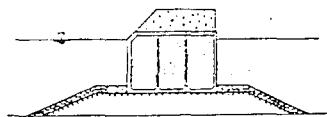


Fig. 21 Sloping Top Caisson

Morihira와 Kunita(1979)는 Goda 공식을 응용하여 설계파 계산방법을 고안(그림 22)하였으며, 이 방법에 의한 힘  $F_s$ 는 항상 경사면에 작용한다.

$$F_s = P_s \cdot \cos\theta \dots\dots\dots(27)$$

$P_s$ : Goda공식에 의한 경사높이  $h_s$ 에 파력분산으로 집중된 힘.

일반적으로 경사 Top 케이슨을 넘치는 전달파는 같은 높이의 수직케이슨보다 크다.

경사높이  $h_c = 1.0 \cdot H_{1/3}$ 인 경사 Top 케이슨은 일반적으로  $\theta = 45^\circ$ ,  $h_s = h_c$  조건에서 검토되어지며 전달파는 벽높이  $h_c = 0.6 \cdot H_{1/3}$ 인 수직케이슨과 같다고 할 수 있다.

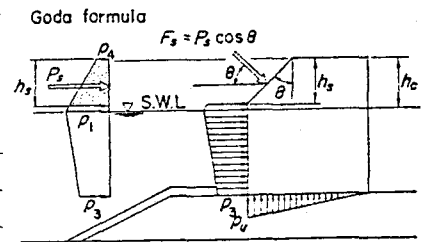


Fig. 22 Wave Force on Sloping Top Caisson

이 설계방법을 기초로한 경사 Top케이슨 방파제( $\theta = 45^\circ$ )는 일본의 여러 항구에서 이미 건설되었다.(니이가타, 사카타, 마야자키)

(3) 사다리꼴케이슨

[그림 23]과 같은 사다리꼴 케이슨도 방파제에 적용할 수 있는 또 다른 경사벽이다.

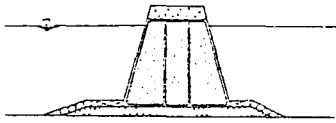


Fig. 23 Trapezoidal Caisson

이 케이슨의 수리특성과 설계파 계산방법은 실험실에서 연구 고안되었다.

(4) Kotadomari 항의 경사 Top케이슨 방파제

사다리꼴케이슨은 제4장에서 자세히 설명하기로 하고 여기서는 경사 Top케이슨 방파제를 소개한다.

Kotadomari항은 일본 남서지방의 작은 섬인 쿠로시마에 위치하고 있으며, 1987년 여름에 건설된 방파제의 길이는 120m로써 바람머리방향은 정박용으로 활용되도록 하였다.

이 방파제는 늦가을에 내습한 태풍 8712호의 높은 파랑으로 인하여 크게 손상되었으며, 그후 경사 Top케이슨 형식의 방파제 복구계획이 수립되었다.

[그림 24]는 경사 Top케이슨으

로 확장된 단면도이며, 파랑조건  $T_{1/3}=12.6S$ ,  $H_{1/3}=9.5m$ ,  $H_{max}=17.1m$ 로 설계되었다.

3·3 오목벽방파제

(1) 다층케이슨

오목벽이 간혹 방조벽에 이용되었지만 방파제에 적용된 예는 없었다.

Goulet은 거대한 오목구조의 방파제를 고안하였으나 실지 적용되지는 않았다.

Tanimoto et al은 [그림 25]의 다층 케이슨을 연구하였다.

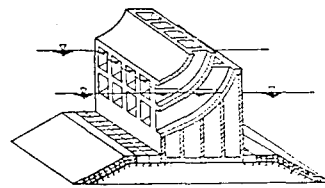


Fig. 25 Multi-cellular Caisson

이 케이슨은 후면이 상향으로 굽어진 3층의 경사면으로 되어 있으며 경사면 사이의 공간은 케이슨 수직 앞면 및 수평 정상의 양

끝부분으로 통한다.

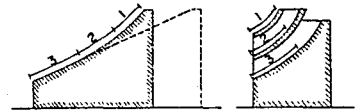


Fig. 26 Idea of Multi-cellular Caisson

다층케이슨의 원리는 [그림 26]과 같이 경사벽에서 시작되며 오목벽은 구조물의 폭을 줄이기 위하여 고안되었다.

이러한 오목벽은 3층 수직의 조밀한 구조로 이루어졌다.

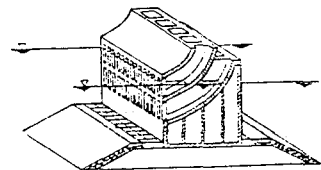


Fig. 27 Multi-cellular Caisson with Slit Wall

수리실험은 비교적 폭이 좁은 다층케이슨의 파력이 매우 안정되어 있고 구멍난 수직벽이 [그림 27]과 같이 전면에 부착되어 있을 때 반사파가 매우 감소함을 증명하고 있다.

(2) 반사파 및 전달파

[그림 28]은 수직으로 가는 구멍이 난 벽과 구멍없는 다층 케이슨의 반사 및 전달계수를 나타내고 있다.

벽체높이  $hc_1$ ,  $hc_2$ 에 대한 정의가 숫자로 설명되고 있으며 이러한 실험결과에 따라  $K_T=0.2$ 에 해당하는 높이는 다음과 같다.

수직구멍벽이 없는 케이슨  $hc_2=0.5hc_1$ 일 때

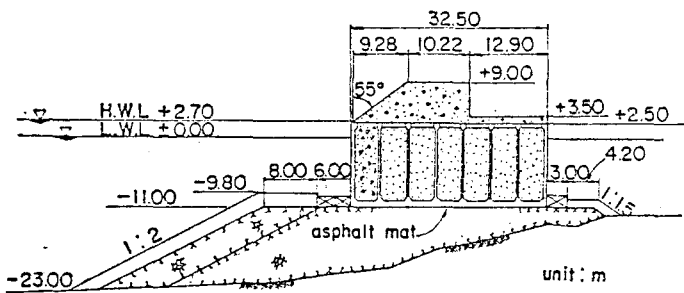


Fig. 24 Cross Section of Sloping Top Caisson Breakwater at Katadomari Port

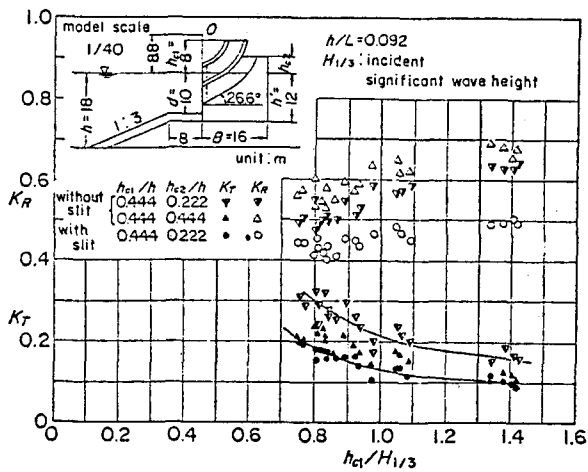


Fig. 28 Reflection and Transmission Coefficients of Multi-cellular Caisson

$$hc_1 = (1 \sim 1.1)H_{1/3}$$

수직구멍벽이 없는 케이슨

$hc_2 = hc_1$ 일 때

$$hc_1 = (0.8 \sim 0.9)H_{1/3}$$

수직구멍벽이 있는 케이슨

$hc_2 = 0.5hc_1$ 일 때

$$0.75H_{1/3}$$

수직구멍벽이 있는 케이슨의 반사계수 범위는 파랑  $h/L_{1/3} = 0.092$ 에 대하여 0.4~0.5이다. 그러나 파랑 조건 특히 파랑기간에 따라 변화하며 가장 좋은 조건일 때 반사계수는 0.2 감소한다.

수직구멍벽이 있는 케이슨의 수리특성은 구멍비율( $\epsilon$ )에 따라 다르며 다음과 같은 함수관계가 있다.

$$\epsilon = S/(D+S) \dots\dots\dots(28)$$

D: 수직구멍벽의 폭

S: 간격

이 구멍벽의 실험연구결과  $\epsilon = 1/3$ 이다.

### (3) 파 력

케이슨의 안정성을 실험하기 위한 설계과는 [그림 29]와 같은 파력의 가설적 분포로 계산할 수 있다.

이때 케이슨은 같은 높이의 수직입체벽으로 대체되고 파력의 수평성분은 수직벽에 작용하는 가설적 파력으로 계산된다.

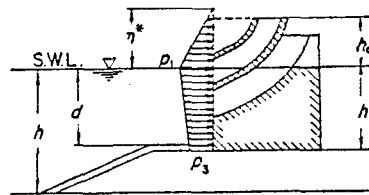


Fig. 29 Wave Pressure Distribution of Multi-cellular Caisson for the Stability Design

압력강도는 일반화된 Goda 공식의 변수로서 다음과 같다.

수직구멍벽이 없는 케이슨

$$: \lambda_1 = 0.6, \quad \lambda_2 = 0$$

수직구멍벽이 있는 케이슨

$$: \lambda_1 = 0.8, \quad \lambda_2 = 0$$

여기서 파력의 수직성분은 3층의 경사면에 작용하는 하향력과 기초반력이 서로 상쇄된다는 가정에서는 고려되지 않는다.

각 부분에 작용하는 파력은 힘의 구조설계에서 주어지며 이러한 목적으로 다음의 강도가 고안되었다.

최상단의 굽은 경사

$$: f = 0.75w_0 \cdot H(-0.5w_0 \cdot H)$$

2번째 굽은 경사

$$: f = 0.5w_0 \cdot H(-0.5w_0 \cdot H)$$

최하단 굽은경사

$$: f = 0.75w_0 \cdot H$$

구멍의 측벽

$$: f = 0.5w_0 \cdot H(-0.5w_0 \cdot H)$$

수직구멍 부분

$$: f = 0.75w_0 \cdot H(-0.5w_0 \cdot H)$$

( )속의 (-)부호 강도는 구멍 옆면을 제외한 바다편의 반대방향을 말한다. (+), (-)부호의 강도는 다른 법면에서 일치하기 때문에 별도로 분리 고려되어야 하며, 바닥굽은 경사에 대한 (-)부호의 강도는 수면이 0.5H이하로 낮을 때 정수압의 변화로서 얻어진다.

### (4) Wakayama 항의 다층케이슨 현장실험

가장 큰 다층케이슨이 1985년 조립되어 Wakayama항 건설에 사용되었으며 [그림 30]은 이 케이슨의 단면도로서 파랑조건  $T_{1/3} = 12.0S$ ,  $H_{1/3} = 5.0m$ ,  $H_{max} = 9.0m$ 로 설계되었다.

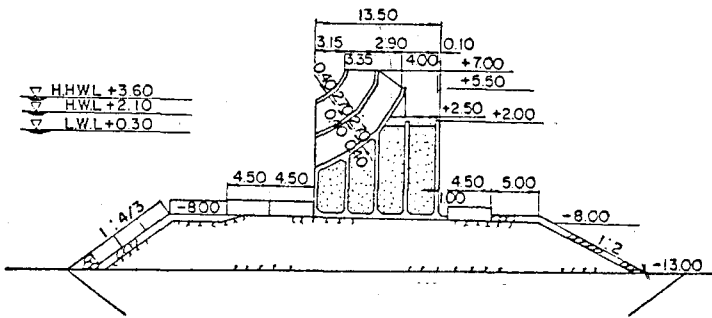


Fig. 30 Cross Section of Multi-cellular Caisson Breakwater at Wakayama Port

[사진 2]는 실험케이슨의 정면도이며 일반케이슨 방파제 사이에 축조된다.

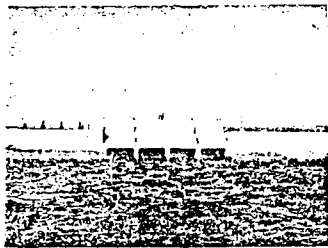


Photo 2 Multi-cellular Caisson

이용될 수 있으며 파랑의 반사, 전달, 반원형 방파제의 힘 등에 관한 수리특성은 실험연구실에서

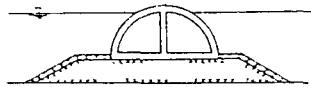


Fig. 31 Breakwater with Semi-circular Section

### 3-4 블록벽 방파제

블록벽의 특징은 [그림 31]과 같이 단면이 반원형일 때 나타나며 앞에서 설명한 대로 반원면에 미치는 파력은 중심을 향하여 작용한다.

따라서 최종압력은 중심부로 작용하며 회전모멘트를 만들지 않는다.

이는 지반의 삼각분포 반력에도 불구하고 기초면에 거의 일정하게 작용한 결과이다. 이러한 장점은 매우 부드러운 지면에서 방파제로

조사되었다.

### 4. 파랑 흡수형 방파제 구조

#### 4-1 수직부분 공벽 및 파장 분산형 케이슨 방파제

제3장에서 논의된 파제벽은 해수를 완전히 차단하도록 되어 있으나 에너지의 일부를 통과시키는 방파제도 여러형태가 있다.

해수면 가까이 불침투성 수직벽을 가진 차단형 방파제가 있으며

이미 여러 항에 건설되었다.

작은 공간이 있는 강제파일 방파제는 또 다른 형태의 것이다.

개방형 방파제의 경우, 입사파 에너지의 일부는 분산되거나 나머지는 해안으로 전파되는 파랑을 방파제 뒤쪽으로 전달한다. 그러나 이러한 구조물을 거치른 해양조건에 응용하는 데는 파랑분산의 적용 뿐만 아니라 구조적 힘의 관점에서 실용적이 되지 못한다.

그러므로 부분공벽과 wave chamber를 가진 불침투성 구조물은 파랑분산 작용이 유지되어 구조물내에서 파랑이 정지될 것으로 판단된다.

이러한 구조물은 Jarlan(1961)이 처음 고안하여 구멍뚫린 케이슨이라 하였으나 이 보고서에는 파랑분산형케이슨이라 한다.

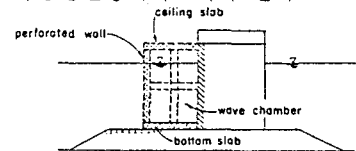


Fig. 32 Structural Elements of Wave Dissipating Caisson

[그림 32]는 파랑분산형 케이슨의 구조요소에 대한 도표이다.

파랑분산형 케이슨은 정면에 구멍 뚫린 벽과 wave chamber로 이루어지며 각각 다른 구조적 요소의 혼합에 의해 다양한 편차가 나타난다.

일반적으로 파랑분산형 케이슨은 다음과 같은 장점이 있다.

- a) 반사파의 감소
- b) 월파에 의한 전달파 감소
- c) 파력의 감소 <다음호계속> ㉔