

# 근접설치된 대형구조물에 의한 구조물주변의 파의 변형

김 창 제\* · 김 정 렬\*

## Wave Deformation by Large Cylindrical Structures

*Chang-Je Kim\* · Jeong-Ryul Kim\**

### 〈 목 차 〉

#### Abstract

#### I. 서 론

#### II. 수리 시험

##### 1. 차원 해석

##### 2. 실험장치와 조건

#### III. 이론해석

##### 1. 속도포텐셜

##### 2. 수위변동

#### IV. 실험결과와 고찰

##### 1. 파고의 평면분포

##### 2. 구조물 전면영역에서의 파고분포

##### 3. 구조물 근방둘레에서의 파고분포

#### V. 결 론

##### 참고문헌

### Abstract

This study examines experimentally and theoretically, the wave deformation by two large cylindrical structures in relation to the case of one structure. The wave height around the structures varies, according to the changes of the incident wave angles, the number of the structure, and the distances between the two structures. The wave deformation around the large cylindrical structures is shown to be well predicted theoretically by the diffraction theory based on the singular point distribution method using a vertical line wave source Green's function.

#### 1. 서 론

연안해역은 옛날부터 생활근거지 또는 생산, 교통 및 수송 등 경제생활의 거점으로서 중요한 역할을 담당하여 왔다. 최근에는 water front 개발 등 연안해역의 다목적 이용개발이 진행됨에 따라

서 그 목적에 부합하는 구조물이 연안해역에 건·축조되고있다. 대형구조물에 의한 파의 변화는, 구조물주변을 항행하는 소형선박의 안전에 악영향을 미치며, 구조물주변의 흐름 등과 같은 물리현상에 변화를 주기 때문에, 그 변화로 인하여 해안침식이나 구조물기부주변의 국소세굴, 심지어는

\* 정희원, 한국해양대학교 해사대학 교수

구조물자체의 파괴가 일어나기도 한다.

구조물중에서도 원통형 구조물은 작용외력의 방향을 고려하지 않아도 좋고, 경관면에 있어서도 뛰어나기 때문에 연안해역 구조물로서 뿐만 아니라 외해역구조물로서도 널리 사용되어 왔다. 고립되어 설치된 대형 원통구조물 주변은, 구조물로부터의 반사파가 탁월한 구조물 전면의 부분중복파영역, 입사파와 구조물에 의한 회절파 또는 반사파로 형성되는 구조물 주변의 중합파영역, 주로 회절파가 형성되는 구조물후면의 회절파영역으로 분류된다. 또한, 대형 구조물주변의 파는 광범위한 영역에 걸쳐서 변화하며, 흐름의 박리현상이 탁월하여 그 영향이 구조물주변의 좁은 영역에 한정되는 소형 원통구조물주변의 그 것과는 다르다.

한편, 대형 원통구조물이 복수로 설치되면, 그 구조물주변의 파는 구조물의 수, 설치간격, 입사파의 입사각도, 구조물의 직경·파장비 등의 변화에 의해 넓은 범위에 걸쳐서 복잡하게 변화한다.

이 연구는 대형 이원통구조물에 의한 구조물주변에서의, 주로 입사파의 입사각도 및 구조물 설치간격의 변화에 의한 파의 변형 특성을, 수리실험과 특이점분포법을 사용한 이론해석에 의해 고립 원통구조물의 경우와 비교하면서 검토한 것이다.

## 2. 수리실험

### 2.1 차원해석

Fig. 1에 나타내듯이, 일정수심  $h$ 인 수역에 직경  $D$ 가 동일한 이원통구조물이 고정되어 있으며, 구조물은 파의 진행방향의 우측으로부터 구조물 I, 구조물 II 라고 한다. 좌표계로서는 직교좌표계 ( $x, y, z$ ) 를 사용한다.  $x$  와  $y$  는 수평축이며, 좌표의 원점을, 이원통구조물의 경우에 두 구조물간의 중앙, 고립구조물의 경우에는 도시하지 않지만 구조물 중심으로 한다.  $x$  축은 입사파의 입사각도  $\alpha$  가  $0^\circ$  의 경우에 대응하여 입사파의 진행방향을 정(+)으로하는 축,  $y$  축은  $x$  축과 직교하는 축,  $z$  축은 정수면을 원점으로하여 상방을 정으로하는 연직축으로 한다. 여기에서  $\eta$  는 수위변동,  $e_1$  은 구조물 설

치간격이며 고립구조물의 경우에는  $e_1 = \infty$  로 한다. 또한 Fig. 1의 상부의 기호에 대해서는 뒤에서 설명한다.

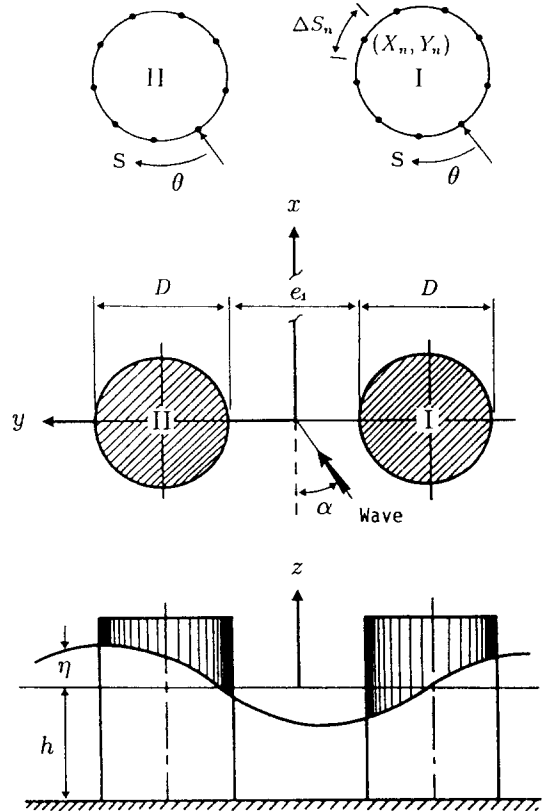


Fig. 1 Coordinate system and symbols

이원통구조물주변의 무차원파고  $H/H_1$ 는, 뒤에서 설명하는 실험의 조건에서는 일반적으로 다음과 같은 4개의 무차원 물리량에 크게 지배된다고 생각된다.

$$\frac{H}{H_1} = \psi\left(\frac{e_1}{D}, \alpha, \frac{r}{D}, \theta\right) \quad (1)$$

여기에서,  $r$ 은 구조물중심에서 반경방향으로의 거리,  $\theta$ 는 입사파가 구조물에 최초로 도달한 점으로부터의 각도이며 그 방향은 입사파의 진행방향에서 볼 때 시계방향으로 한다.

## 2. 2 실험장치와 조건

길이 28m, 폭 11m 및 깊이 0.8m인 평면파랑수조를 사용하여 실험을 하였다. 이 수조의 일단에는 피스톤형 조파장치가, 타단에는 1/10경사를 가진 소파사면이 설치되어 있으며, 측면에는 구조물로부터의 회절파의 측벽에 의한 반사를 막기위해 소파 filter를 설치하였다. 수조내에는, 선단에 1/15경사면을 가진 높이 7cm의 수평상을, 수조 중앙부에 직경 47.2cm, 길이 50cm의 아크릴제 원통구조물 모형을 설치하였다. 또한 이 구조물 모형은 윗파하지 않도록 정수면상 30cm로 하였으며, 이원통 구조물의 경우에는, 직경  $D$ 가 동일한 구조물을 사용하여, 구조물 설치간격  $e_l$ 을  $D$  및  $2D$ 로 변화시켰다.

실험에는 정수심  $h$ 를 20cm로 하고, 주기  $T$ 가 1.4s, 입사파고  $H_I$ 가 5.7cm인 파를 작용시켰다. 고립구조물의 경우, 구조물의 직경·파장비  $D/L$ 를 0.26으로 하여 대형구조물의 조건( $D/L \geq 0.2$ ) (Isaacson, 1979)을 만족시켰다. 이원통구조물의 경우에는 조파기의 위치를 고정하고 구조물의 방향을 바꾸어 입사파의 입사각도  $\alpha$ 를  $0^\circ$ (직각입사)와  $45^\circ$ 로 변화시켰다.

각각의 실험조건에 대하여, 구조물주변의 수위변동을 전기용량식수위계(계측기연CH-306) 3대를 사용하여 10~25cm간격의 정방격자상에서 계측하였다. 또한 내파안정성에있어서 중요한 위치인 구조물둘레의 수위변동을  $r/D=0.53$ 인 위치에서  $22^\circ$  5간격의 각도로 합계 16지점에서 상세히 계측하였다.

계측한 수위변동의 시간파형을 pen-recorder에 출력시킴과 동시에, 50Hz로 이산화하여 프로피디스크에 수록하고 해석에 사용하였다. 또한, 사면 또는 측벽으로부터의 반사파의 영향을 최소화하기 위해서 수위계측을 조파직후 약 30초 이내로 한정하였다.

## 3. 이론해석

### 3. 1 속도포텐셜

유체는 비점성 및 비압축성, 유체운동은 비회전

운동으로 가정할 때, 속도포텐셜  $\phi(x, y, z; t)$  ( $t$ 는 시간)를 정의할 수 있으며 이 속도포텐셜  $\phi$ 는 Laplace방정식을 만족한다. 이 연구에서는 연직방향에 일양한 원통구조물을 대상으로 하기 때문에 회절이론을 기본으로 하는 특이점분포법의 일종인 연직선 용출함수(Isaacson, 1978)를 사용하는 선형해석을 한다(Kim and Iwata, 1993; 김 등, 1994a). 즉, Fig. 1에 나타낸 연직주의 임의점  $(x, y, z)$ 에 있어서의 회절산란파의 속도포텐셜  $\phi_s(x, y, z; t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_s = \frac{gk \cosh k(h+z)}{4\pi\sigma \cosh kh} \int_s F(X, Y)G(x, y)dS(X, Y)\exp(-i\sigma t) \quad (2)$$

여기에서,  $g$ 는 중력가속도,  $k(=2\pi/L)$ 는 진행파의 파수,  $\sigma(=2\pi/T)$ 는 각주파수,  $F$ 는 용출강도 분포함수이며 구조물물수표면의 불투과조건에 의해 결정되는 미지함수,  $(X, Y)$ 는 용출점의 위치,  $S$ 는 Fig. 1의 상부에 나타낸 것처럼 구조물표면의 선요소,  $i(i=\sqrt{-1})$ 는 허수단위이고  $G$ 는 Green함수이며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$G(x, y, X, Y) = i\pi H_0^{(1)}(kr)$$

여기에서,  $r=\{(x-X)^2+(y-Y)^2\}^{1/2}$ ,  $H_0^{(1)}$ 는 0차의 제1종 Hankel함수이다.

Fig. 1의 선요소  $S$ 를 유한개의 선적분  $\Delta S_n(n=1 \sim N)$ 으로 분할하여 선적분  $\Delta S_n$ 의 중앙점  $(X_n, Y_n)$ 에서 용출시키는 중앙점근사법을 채용하면, 식 (2)는 식 (3)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{gk \cosh k(h+z)}{\pi\sigma \cosh kh} \sum_{n=1}^{\infty} F(X_n, Y_n)A_n(x, y) \quad (3)$$

여기에서,  $\phi_s$ 는 식 (2)에서  $\exp(-i\sigma t)$ 를 생략한  $\phi_s$ 의 복소진폭이며,  $A_n$ 은 다음 식으로 나타낸다

$$A_n = \int_{\Delta S_n} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) dS(X, Y) \quad (4)$$

구조물 물수표면에있어서의 불투과조건을 사용

하면 용출강도 분포함수  $F$ 를 결정할 수 있으며, 식 (3)에서  $\phi_S$ 가 구해진다. 입사파의 속도포텐셜의 복소진폭  $\phi_I$ 는 기지의 값이기 때문에 전속도포텐셜의 복소진폭  $\phi = \phi_I + \phi_S$ 가 구해지며, 따라서 전속도포텐셜  $\Phi = \Phi_I + \Phi_S$ 가 구해진다. 이 연구에서는 해의 정도를 높이기 위해서  $\Delta S_n = 48$ 로 분할하여 계산에 이용하였다. 또한 특이점의 처리는 中村와 輿(1985)의 방법에 따랐다.

### 3.2 수위변동

미소진폭파를 가정할 때, 역학적 자유수면 경계 조건에 의해 구조물주변의 수위변동  $\eta$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{i\sigma}{g} \phi \exp(-i\sigma t) \quad (5)$$

또한 구조물주변의 파고  $H$ 와 무차원파고  $H/H_I$ 는 각각 다음 식 (6)과 (7)처럼 나타낼 수 있다.

$$H = 2 \left| \frac{i\sigma}{g} \phi \right| \quad (6)$$

$$\frac{H}{H_I} = \frac{|\phi|}{|\phi_I|} \quad (7)$$

여기에서,  $| \quad |$ 는 절대치를 나타낸다.

## 4. 실험결과와 고찰

### 4.1 파고의 평면분포

Fig. 2에 입사파의 입사각도  $\alpha = 0^\circ$ , 구조물의 무차원 설치간격  $e_l/D = 1.0$ 일 때의 무차원파고  $H/H_I$ 의 등파고선도를 보인다. 그림 속의 실선은 식(7)을 계산한 등고선, ●는 수위의 계측점, 괄호 속의 숫자는 계산치, 괄호가 없는 경우의 숫자는 실험치이다. 또한,  $\alpha = 0^\circ$ 일 때, 파고의 분포는  $y/L = 0$ 축을 중심으로 하여 거의 대칭이므로 전영역의 반만을 나타냈다. 이 경우에 구조물 II는 입사파의 입사방향에서 볼 때 구조물 I의 좌측에 위치한다. 그림에

서 구조물전면영역은 무차원파고가 큰 배( $y/L \approx 0.25$ 부근일 때  $x/L \approx -0.13, -0.63$  부근)와, 무차원 파고가 작은 절( $y/L \approx 0.25$ 부근일 때  $x/L \approx -0.38, -0.75$  부근)이 교호로 나타나는 부분중복파동장이 형성된다. 구조물근방의  $\theta = 270 \sim 120^\circ$ 의 위치에서의 파고는 입사파고보다 크며( $H/H_I \geq 1.0$ ), 무차원 파고의 최대치는 약 1.6, 최소치는 약 0.8이다. 또한, 구조물의 직경·파장비  $D/L$ 가 더 큰 경우의 파고의 공간변화는  $D/L$ 이 작은 경우보다 더 커진다는 것이 밝혀져 있다(김 등, 1994b).

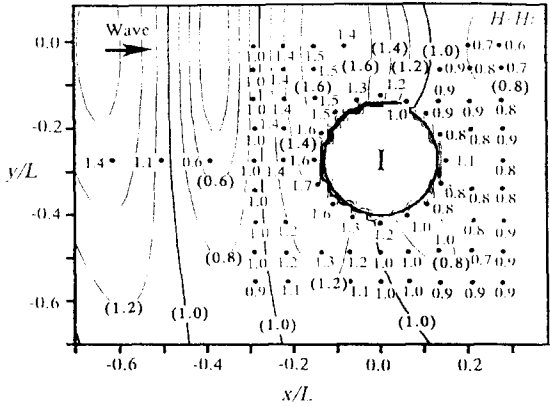


Fig. 2 Wave height distribution around structure I ( $e_l/D = 1.0, \alpha = 0^\circ$ )

입사파의 입사각도  $\alpha = 45^\circ$ , 구조물의 무차원 설치간격  $e_l/D = 1.0$ 일 때의 무차원파고  $H/H_I$ 의 등파고선도를 Fig. 3에 보여주고 있다. 그림 속의 기호는 Fig. 2의 경우와 동일하다. 바다쪽 구조물(구조물I)전면의 무차원파고의 최대치( $H/H_I \approx 1.8$ )는, 해안쪽 구조물(구조물II)인 경우의 최대치( $H/H_I \approx 1.4$ ), 또는  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우의 최대치( $H/H_I \approx 1.6$ )보다 크다. 이것은, 바다쪽 구조물은 해안쪽 구조물의 전면에 위치하여 해안쪽 구조물전면에 형성되는 부분중복파동장의 영향을 받기 때문이다. 그리고 구조물간의 내측영역에서는 해안쪽 구조물주변의 파고가 바다쪽 구조물주변의 파고보다 크다. 이것은, 해안쪽 구조물인 경우, 입사파가 구조물에 도달하여 반사 또는 회절되어 파고가 커지지만, 바다

쪽 구조물인 경우에는, 입사파의 회절영역에 위치하기 때문에 파고가 작아졌다고 추측된다.

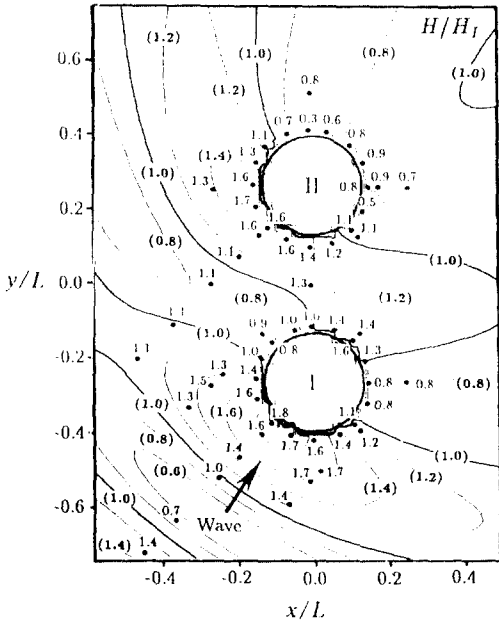


Fig. 3 Wave height distribution around two structures( $e/D=1.0$ ,  $\alpha=45^\circ$ )

입사파는 유한진폭성이 크지만(비수심  $h/L=0.11$ , 파형구배  $H_1/L=0.03$ ), 구조물주변에서의 무차원파고  $H/H_1$ 의 실험치와 계산치는 상당히 잘 일치한다 (Fig. 2 및 Fig. 3 참조).

4. 2 구조물 전면영역에서의 파고분포

Fig. 4는, 입사파의 입사각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우의 구조물의 전면영역에 형성되는 무차원파고  $H/H_1$ 와, 구조물표면으로부터 전면영역으로의 무차원거리  $x'/L$ 의 관계를 나타낸 것이다. 이 전면영역에서는 부분중복파동장이 형성되기 때문에, 구조물의 벽면부는 부분중복파의 배에 해당되어 파고가 커지므로, 구조물의 중심을 통하여 바다쪽을 정으로하는  $x$ 축에 평행한 축을  $x'$  축(구조물벽면을 원점으로 한다)으로 정의하여 사용한다. 그림에서 무차원

파고  $H/H_1$ 는  $x'/L \approx 1/4$ 에서 극소,  $x'/L \approx 0$ 과  $1/2$ 에서 극대로 되며, 대형구조물 전면영역에서는 이 차원파동장인 부분중복파의 파고분포에 가까운 변동특성을 나타낸다고 할 수 있다. 구조물의 무차원 설치간격  $e_1/D$ 가 1.0인 경우(그림에서  $\Delta$ )에, 배에 해당하는  $x'/L \approx 0, 1/2$ 인 위치에서는 고립구조물( $e_1/D = \infty$ )인 경우(그림에서  $\circ$ )에 가까운 값을 나타내는데 비해서, 절에 해당하는  $x'/L \approx 1/4$ 인 위치에서는 작은 값을 취하는 등 파고의 변동이 크다. 또한, 구조물의 무차원 설치간격  $e_1/D$ 가 2.0인 경우(그림에서  $\square$ )의 배와 절의 파고의 차는, 고립구조물인 경우의 배와 절의 파고의 차처럼 확실하지는 않다. 대형구조물이 2기 설치되면, 입사파와 구조물 I로부터의 회절파이외에 구조물 II로부터의 회절파도 존재하므로 이런 3파에 의해 복잡한 중첩중복파로서의 파동장이 형성된다. 이 경우에 구조물 I과 II로부터의 2회절파의 위상관계가  $e_1/D$ 에 의해 변화한다. 따라서  $e_1/D=1.0$ 일 때에는, 파고변화가 확실한 부분중복파를 형성하며,  $e_1/D=2.0$ 일 때에는, 고립구조물인 경우보다 파고변화가 작은 부분중복파를 형성한다고 생각된다.

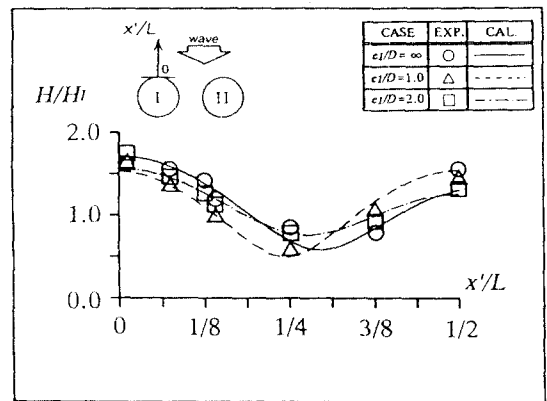


Fig. 4 Wave height distribution in front of structures( $\alpha=0^\circ$ )

Fig. 5에, 입사파의 입사각도  $\alpha=45^\circ$ , 구조물의 무차원 설치간격  $e_1/D=1.0$ 일 때의 무차원파고  $H/H_1$ 와 무차원거리  $x'/L$ 의 관계를 나타낸다. 바

다쪽구조물(구조물 I)전면의 파고분포(그림에서 ○)는 고립구조물전면의 파고분포(Fig. 4)와 닮아 있다. 이것은, 입사파의 입사방향에서 볼 때 해안 쪽 구조물(구조물 II)은 바다쪽 구조물의 후방에 위치하므로 바다쪽 구조물 전면영역에서는 해안쪽 구조물에 의한 영향을 비교적 받기 어렵기 때문이다. 한편, 해안쪽 구조물 전면영역에서는  $x'/L=1/8 \sim 1/2$ 사이의 변화가 작다. 이것은, Fig. 3에서 알 수 있듯이, 해안쪽 구조물의 전면영역은 바로 옆의 바다쪽 구조물에 의한 회절파의 영향을 받으므로 직각입사의 경우에는 볼 수 없는 독특한 간섭이 일어났기 때문이다.

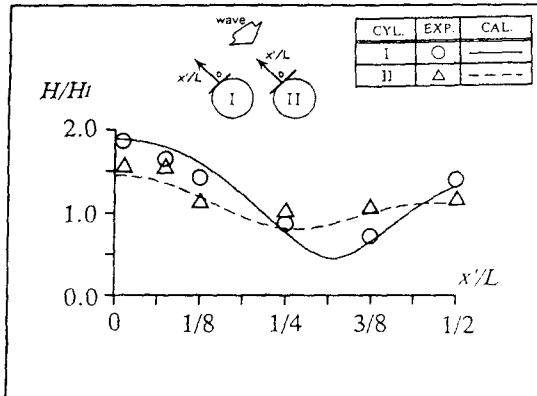


Fig. 5 Wave height distribution in front of two structures( $e_1/D=1.0, \alpha=45^\circ$ )

Fig. 4 및 Fig. 5의 예에서 보인 것처럼, 구조물 전면영역에서의 무차원파고  $H/H_r$ 의 실험치와 계산치의 대응은 상당히 좋다.

### 4.3 구조물 근방돌레에서의 파고분포

Fig. 6은, 입사파의 입사각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우,  $r/D=0.53$ (구조물벽면으로부터 1.5cm)위치의 구조물돌레에 형성되는 무차원파고  $H/H_r$ 의  $\theta$ 의 변화에 따른 변동특성을 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 구조물돌레의 각도, 종축은 무차원파고를 나타낸다. 또한, ○은  $e_1/D=\infty$ (고립구조물), △은

$e_1/D=1.0$ , □은  $e_1/D=2.0$ 일 때의 실험치, 실선은 고립구조물, 쇄선은  $e_1/D=1.0$ , 일점쇄선은  $e_1/D=2.0$ 일 때의 계산치를 나타낸다. 일반적으로 구조물 근방돌레에서의 파고는 입사파가 구조물에 직각으로 도달하는  $\theta \approx 0^\circ$  부근의 위치에서 입사파고의 1.6~1.8배 정도의 최대치를 취하며, 구조물배후에 가까와짐에 따라 서서히 작아지지만,  $\theta \approx 180^\circ$  부근에서는 그 가까이의 극소치보다 약간 큰 극대치를 취하는 경향이 있다. 이 극대치는 구조물의 양 측면에서 돌아 들어간 회절파가  $\theta \approx 180^\circ$  부근에서 만나, 2파가 동위상으로 중합하였기 때문이라고 생각된다.  $e_1/D=1.0$ 일 때(그림에서 △)는, 안쪽영역의  $\theta \approx 45^\circ$  부근에서  $H/H_r$ 는 최대값을 취하지만,  $e_1/D=2.0$ 일 때(그림에서 □)는,  $\theta \approx 45^\circ$  부근에서  $H/H_r$ 는 극소값을 취한다. 이 원인으로서, 구조물 전면에서는 부분중복파가 형성되어,  $e_1/D=1.0$ 일 때 그 배가,  $e_1/D=2.0$ 일 때 그 절이  $\theta \approx 45^\circ$  부근에 와 있기 때문이라고 생각된다. 구조물의 설치간격  $e_1/D$ 가 커짐에 따라서 구조물주변의 파고분포에 미치는, 다른 하나의 구조물에 의해 생기는 회절파의 영향이 작아지기 때문에 파고분포에 미치는 구조물의 설치간격  $e_1/D$ 의 영향은 작아지며,  $e_1/D$ 가 커짐에 따라서 2원통구조물주변에서의 파고분포는 진동하면서 고립구조물인 경우의 파고분포에 가까와진다.

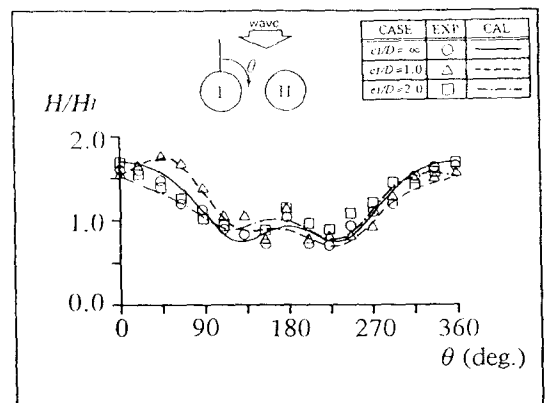


Fig. 6 Wave height distribution along structures ( $\alpha=0^\circ, r/D=0.53$ )

입사파가 구조물에 대하여 비스듬히 입사하는 경우에는, 직각입사( $\alpha=0^\circ$ )하는 경우보다 구조물주변의 파고변화는 더 복잡해진다. Fig. 7은 입사파의 입사각도  $\alpha=45^\circ$ , 구조물의 무차원설치간격  $e_1/D=1.0$ 일 때,  $r/D=0.53$ 인 위치에서의 무차원파고  $H/H_1$ 와  $\theta$ 의 관계를 하나의 예로서 나타낸 것이다. 그림에서  $\circ$ 은 바다쪽 구조물(구조물 I),  $\triangle$ 은 해안쪽 구조물(구조물 II)둘레에서의 무차원파고의 실험치, 실선은 바다쪽 구조물, 쇄선은 해안쪽 구조물둘레에서의 계산치(식 (7))를 나타낸다. 입사파가 비스듬히 입사하는 경우의 파고는 직각입사하는 경우보다도 커지는 경향이 있다. 또한, 앞에서 설명하였듯이, 바다쪽 구조물의  $\theta \approx 180^\circ$  부근의 극대치는 바다쪽 구조물 양측면으로부터 돌아 들어간 파와 해안쪽 구조물로부터의 회절파가 중첩하여 극대치를 취한다고 생각된다. 똑같은 기구에 의해 해안쪽 구조물의  $\theta \approx 130^\circ$  부근에서의 극대치를 설명할 수 있다.

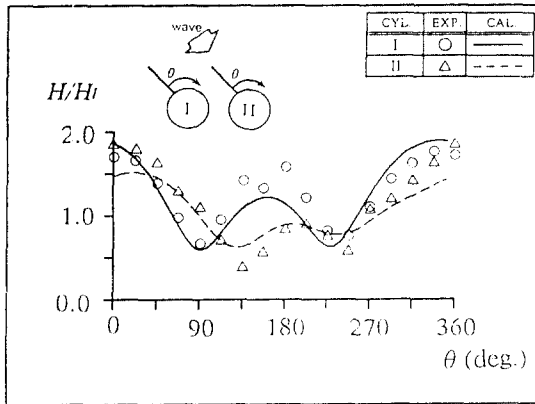


Fig. 7 Wave height distribution around two cylinders( $e_1/D=1.0$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $r/D=0.53$ )

Fig. 6 및 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 실험치와 계산치의 대응은 전체적으로 양호하다.

## 5. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이, 대형구조물 주변에서의 파고는 입사파의 입사각도, 구조물의 설치간격 및 수 등에 의해 복잡하게 변하며, 특이점분포법을 사용하여 정도 높게 예측할 수 있다. 따라서 이 연구는, 대형구조물 주변을 항행하는 소형선박의 안전성문제, 구조물의 내파설계 등에 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것이라고 본다.

## 참 고 문 헌

- 1) Isaacson, M. Q.(1978) : Vertical Cylinders of Arbitrary Section in Waves, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 104, pp. 309-322.
- 2) Isaacson, M. Q.(1979) : Wave induced Forces in the Diffraction Regime, in Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, ed. T. L. Shaw, Pitman, pp. 68-89.
- 3) Kim, C. -J. and K. Iwata(1993) : Local Scouring around Two Large Circular Cylinders, 25th IAHR, Vol. 3, pp. 159-166.
- 4) 金昌濟·眞田武·今井聰·宮池克人·岩田好一朗(1994a) : 복수의 대구경원통구조물 주변의 파동장의 특성에 관한 연구, 해안공학논문집, 제41권, 일본토목학회, 51-355(in Japanese).
- 5) 金昌濟·安部智彦·眞田武·今井聰·宮池克人·岩田好一朗(1994b) : 복수기의 대구경원통구조물주위의 유속장에관한 연구, 해양개발논문집, Vol. 10, 일본토목학회, 313-318(in Japanese).
- 6) 中村孝幸·奥吉雄(1985) : 임의평면형상을 가진 체구조물주변의 파변형의 해석법에 관하여, 제32회 해안공학강연회논문집, 일본토목학회, pp. 594-598(in Japanese).