

대구경 복수원통 구조물 주변의 저면 전단력 특성에 관한 연구

岩田 好一朝 *

水谷 法美 **

金 昌濟 ***

1. 서 론

암반상에 설치된 해양구조물의 주변에서는 국소세굴이 일어나지 않는다는 견해가 일반적이지만, 실제로 국소세굴이 발생한 예¹⁾가 있으며 국소세굴은 지금까지의 인식과는 달리 발생하는 것으로 판명되었다.

국소세굴은 파동, 해·조류, 저질, 구조물의 형상 및 주변지형 등 여러 가지 요인의 영향을 받기 때문에 그 현상이 복잡하며 아직도 미해결점이 많이 남아 있다. 이렇듯 많은 요소가 복잡하게 얽혀있는 국소세굴 주변의 유체운동의 기본적인 성질을 파악하여, 국소세굴의 발생원인과 발생기구를 밝히는 것이 중요하다.

그러나 지금까지의 연구는 주로 세굴의 결과, 즉 세굴현상 그 자체를 중심으로 이루어지고 있으며²⁾³⁾ 그 발생기구 특히 세굴에 밀접하게 관계하는 구조물 주변의 저면 전단력의 특성을 논의한 연구는 이루어지지 않고, 그 실태가 밝혀지지 않고 있다. 특히, 대구경 원통상 구조물이 여러 개 설치된 경우, 단원통 구조물의 경우와 비교해서 어떻게 변화하는가를 취급한 연구는 없으며 조금히 해명해야만 할 과제이다.

따라서 이 연구에 있어서는, 대구경 복수원통 구조물을 대상으로 국소세굴 현상의 외력으로서 중요한 요인인 파도에 의한 저면 전단력을 구조물 주변 파동장과 관련지어 논의하고자 한다.

* 名古屋大學 土木工學科 教授

** 名古屋大學 土木工學科 助教授

*** 名古屋大學 土木工學科 大學院生

2. 차원 해석 및 수리실험

2.1 차원 해석

저면 유속 U 는 다음의 13개 물리량에 지배된다고 가정할 수 있다.

$$u = \phi'_1(D, h, e, H_I, L, \alpha, g, \nu, S, \rho, r, \theta, t) \quad (2.1)$$

여기에서 D : 원통 구조물의 직경, h : 설치 수심, e : 구조물의 간격, H_I : 입사 파고, L : 입사 파장, α : 파향, g : 중력가속도, ν : 물의 동점성 계수, S : 해저 경사, ρ : 물의 밀도, γ : 동경, θ : 방위각, t : 시간이며 정의도를 그림 1에 나타낸다. 이것을 Buckingham의 π 정리를 이용하면 10개의 무차원량으로 변환할 수 있다.

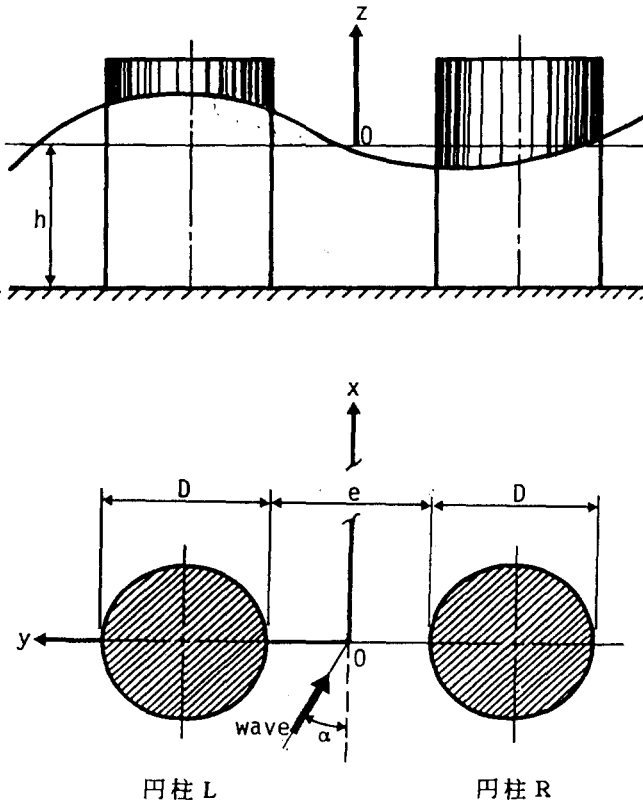


그림 1. 정의도

$$u/\sqrt{gH_I} = \phi_1(D/h, e/D, H_I/h, kD, \alpha, D\sqrt{gH_I}/\nu, S, r/D, \theta, t\sqrt{gH_I}/L) \quad (2.2)$$

단, $K=2\pi/L$ 이며, 입사파의 파수이다.

그리고 저면 전단력 τ 는 3장에서 나타내듯이 층류경계층 이론에 의하면 주로 저면 유속에 의해 지배된다. 따라서 저면 전단력도 유속과 똑같이 다음의 13개의 물리량에 지배된다.

$$\tau = \phi_2'(D, h, e, H_I, L, \alpha, g, \nu, S, \rho, r, \theta, t) \quad (2.3)$$

식 (2.3)을 10개의 무차원양으로 표시하면 식 (2.2)와 똑같이 다음 식이 된다.

$$\tau/\rho g H_I = \phi_2(D/h, e/D, H_I/h, kD, \alpha, D\sqrt{gH_I}/\nu, S, r/D, \theta, t\sqrt{gH_I}/L) \quad (2.4)$$

이 연구에서는 파의 변형 특성, 저면 유속 및 저면 전단력을 위에서의 무차원량과 관련지어 검토할 것이지만 실험의 제약상 모든 무차원량을 검토하는 것은 불가능하다.

그래서 D/h , S 를 일정하게 하고 특히 영향을 크게 미칠 것으로 생각되는 e/D , H/h , $\sqrt{gH_I} \times D/\nu$, γ/D 및 θ 의 효과에 대해서 주로 검토한다. 또한, γ/D 와 θ 대신에 x/L , y/L 을 사용하는 것도 가능하다. 여기에서 x , y 는 서로 직교하는 수평축이다.

2.2 수리 실험

길이 30m, 폭 10m 및 깊이 0.6m인 평면 수조를 이용해서, 수조내에는 선단에 경사 1/15인 사면을 가진 높이 7cm의 경사판 (1편이 6m×6m)을 설치하고, 그 후면은 수평이 되도록 하여 후면의 위에 원통 모형을 설치하였다.

원통 모형은 직경 47.2cm인 아크릴제이며, 이 모형을 정8각형의 아크릴제 저판에 고정하고 아크릴제 저판이 수평 판자에 부드럽게 접속하도록 설치하였다 (그림 2). 원통 주변 저판상의 원통 외벽으로부터 1.5cm, 6.5cm 위치에 전단력계를 설치하였다. 또한 전단력계로부터 $\theta=90^\circ$ 인 위치에 전기용량식 수위계를, $\theta=180^\circ$ 인 위치에 파압계를, $\theta=270^\circ$ 인 위치에 전자유속계를 설치하였다. 그리고 또 하나의 원통 모형을 실험 조건에 맞추어 소정의 위치에 설치하였다.

실험 조건은, 수심을 수평 판자에서 20cm로 일정하게 하고 입사파의 주기를 1.0 sec와 1.4 sec로 두 종류, 입사 파고 H 를 각각의 주기에 대해서 비쇄파와 쇄파로 두 종류

(4.0cm, 15.0cm) 변화시켰다. 또한, 쇠파는 원통 전면에 일어나도록 하였다. 그리고 원통 간격 e 를 $e/D=\infty$ (단원통의 경우), 1.0 및 2.0의 두 종류로 변화시켰다. 원통 모형을 2개 설치한 경우에는 파의 입사 방향 α 를 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ 로 세 종류 변화시켰다. 각각의 조건에 대하여 정팔각형의 저판을 회전시키면서 θ 를 45° 간격으로 8종류 변화시켜 반경 방향과 접선 방향의 저면 전단력을 합계 16개소에서 측정하였다. 동시에, 각 지점에서의 저면 유속, 파압, 수위 변동을 측정하였다. 측정한 수위, 유속, 압력의 시간 파형을 모두 자기 테이프에 기록함과 동시에 펜 레코더에 출력시켜 해석에 사용하였다.

3. 수치 해석

3.1 속도 포텐셜

실험결과를 보다 상세하게 파악하기 위해서 수치해석도 아울러 행하였다. 이 연구에서 사용한 해석 기법에 관해서 아래에 간단히 설명한다. 이 연구에서는 연직 방향으로 는 변화가 없는 구조물을 대상으로 하기 때문에 계산 시간, 계산 기억용량면에서 경제

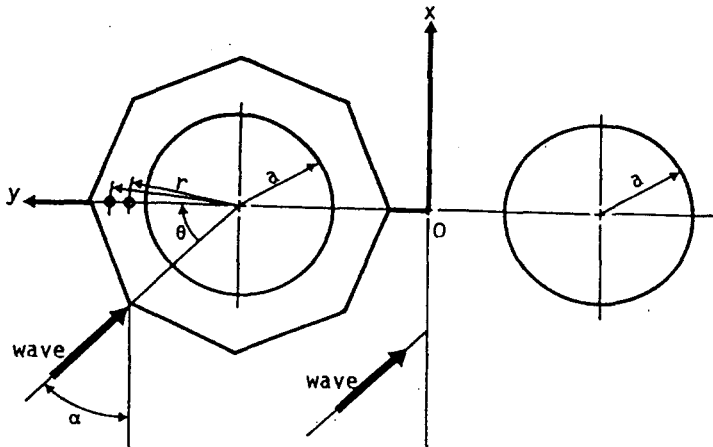


그림 2. 실험 모형의 개략

성이 큰 연직선 Source distribution 함수⁴⁾⁵⁾를 이용한 선형 해석을 하였다.

그림 3에 나타내듯이 임의의 평면 형상을 가진 연직주 주위의 임의의 점 (x, y, z) 에 있어서의 회전파의 속도 포텐셜 $\Phi_D(x, y, z; t)$ 는 식 (3.1)에 주어진다.

$$\Phi_D(x, y, z; t) = \frac{gk \cosh k(h+z)}{4\pi\omega \cosh kh} \int_s F(X, Y) \cdot G(x, y; X, Y) \cdot e^{-i\omega t} dS(X, Y) \quad (3.1)$$

여기에서 k :진행파의 파수, h :수심, ω :각주파수, (x, y, z) : Φ_D 를 구하는 좌표점, (x, y) :Source distribution의 위치, s :물체의 표면요소, i :허수, t :시간, F :Source distribution의 강도를 나타내는 분포함수이며 후술하는 물체 표면상에서의 경계조건에 의해 결정되는 미지함수이다. 그리고 G :는 Green 함수이며 식 (3.2)에 주어진다.

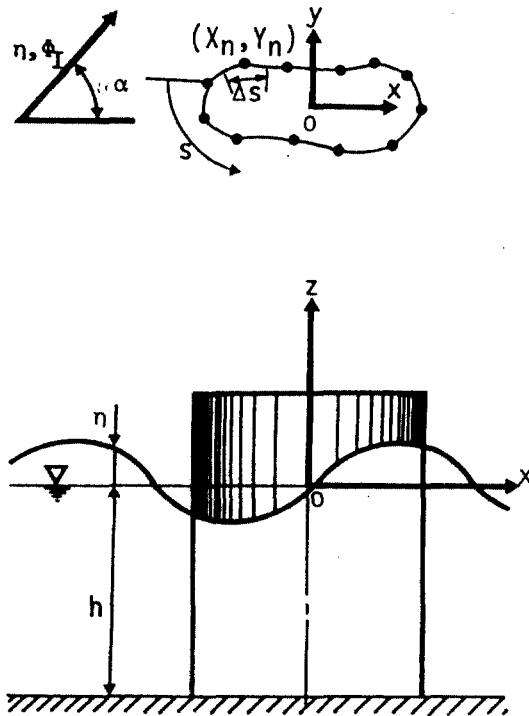


그림 3. 수치 해석의 좌표계

$$G(x, y, X, Y) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad (3.2)$$

여기에서 $r = \{(x-X)^2 + (y-Y)^2\}^{1/2}$ 이며 $H_0^{(1)}$ 은 0차의 제 1종 Hankel 함수이다.

식 (3.1)은 3차원 파동장의 Green 함수를 핵함수로 하는 Source distribution method로 부터 유도된다. 즉 그림 3의 연직주의 경우, Source distribution 함수의 z 에 관한 함수형을 이미 알고 있으므로 면적분에 있어서의 z 에 관한 적분이 해석적으로 행해져 식 (3.1)과 같은 선적분으로의 표시로 유도되는 것이다. 그림 3에 나타내듯이 단면적분 S 를 유한개의 선적분 $\Delta S_n (n=1, N)$ 으로 분할하고 각 선분의 중앙점 (X_n, Y_n) 에 Source distribution 을 집합시키는 중앙점 근사법을 채용하면 식 (3.1)은 식 (3.3)처럼 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\phi_D(x, y, z; t) = \frac{gk \cosh k(h+z)}{\pi\omega \cosh kh} \sum F(X_n, Y_n) \cdot A_n(x, y) \quad (3.3)$$

여기에서 ϕ_D 는 식 (3.1)의 Φ_D 에서 $e^{-i\omega t}$ 를 제외시킨 것이며, A_n 은 식 (3.4)에 표시되는 것이다.

$$A_n = \int_{\Delta S_n} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) dS(X, Y) \quad (3.4)$$

물체 표면에 있어서의 불투과 조건식 (3.5)을 이용하면 Source distribution 분포함수 F 를 결정할 수 있으며 식 (3.1)에서 ϕ_D 가 구해진다.

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} + \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S) \quad (3.5)$$

여기에서 ϕ_I 는 입사파의 속도 포텐셜이며 미소진폭파 이론에 의해 식 (3.6)에 주어진다.

$$\Phi_I(x, y, z; t) = -\frac{igH_I \cosh k(h+z)}{2\omega \cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (3.6)$$

3.2 저면 전단력

선형 경계층 이론에 의하면⁶⁾ 저면 전단력 τ 는 저면 유속 u_b 를 이용하여 구해진다. u_b 는 일반적으로 식 (3.7)처럼 쓸 수 있다.

$$u_b = \bar{u}_b \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (3.7)$$

또한, 저면에 작용하는 마찰 응력 τ 는, 저면에 수직으로 z 축을 잡으면 식 (3.8)처럼 된다.

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{\partial u_b}{\partial z} \quad (3.8)$$

여기서 ν : 물의 동점성계수, ρ : 물의 밀도이다.

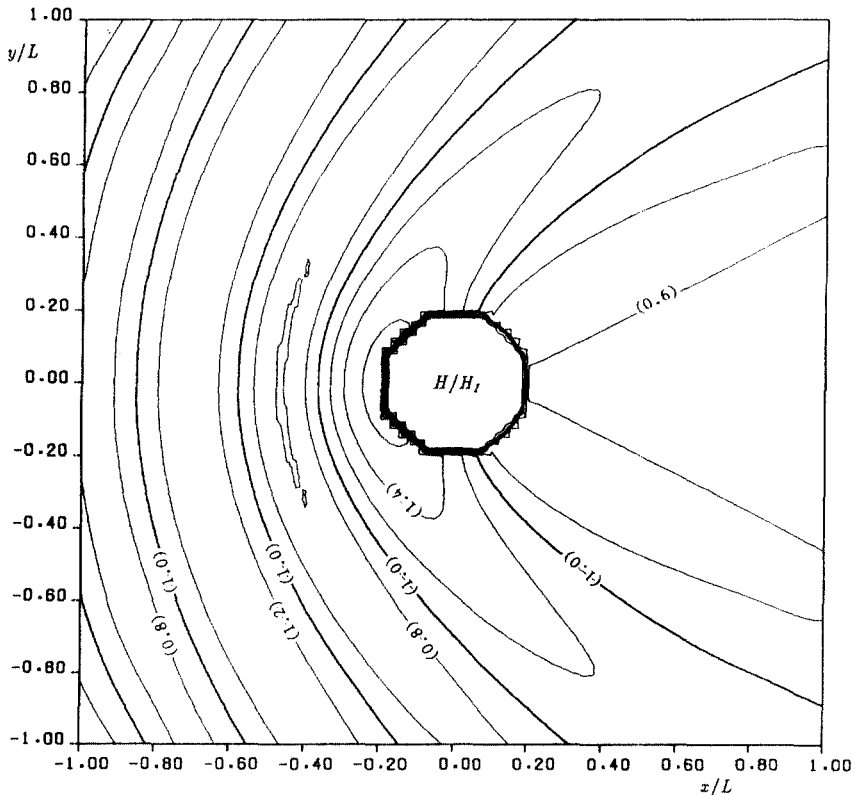


그림 4. 등파고선도 ($kD=2.44$, $e/D=\infty$, $\alpha=0^\circ$)

식 (3.7)을 U_b 의 연직 방향 분포를 고려하여 식 (3.8)에 대입하면 식 (3.9)⁷⁾처럼 된다.

$$\tau = \rho\sqrt{\omega\nu\bar{u}_b} \cos(k_x x + k_y y - \omega t - 90^\circ) \quad (3.9)$$

여기에서 무차원 마찰계수 f 를 다음과 같이 정의한다.

$$f = \tau / \rho\bar{u}_b^2 \quad (3.10)$$

그리고 파에 관한 Reynolds수 Re 는 U_b 를 이용하여 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$Re = \bar{u}_b^2 T / \nu \quad (3.11)$$

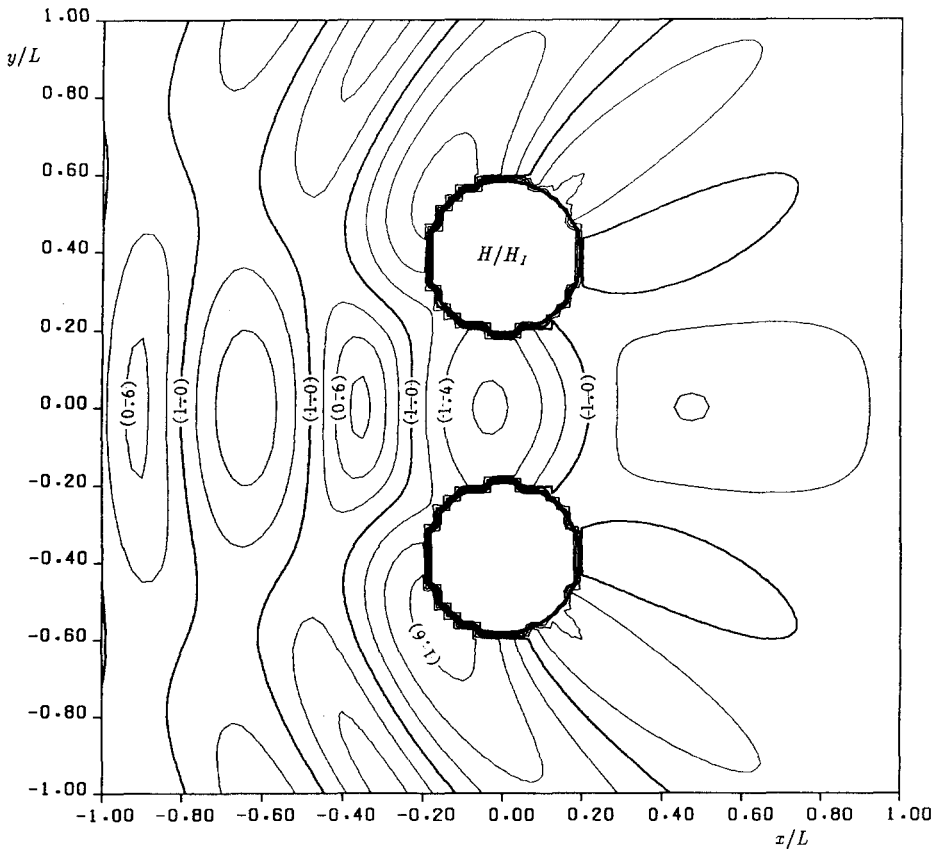


그림 5. 등파고선도 ($kD=2.44$, $e/D=1.0$, $\alpha=0^\circ$)

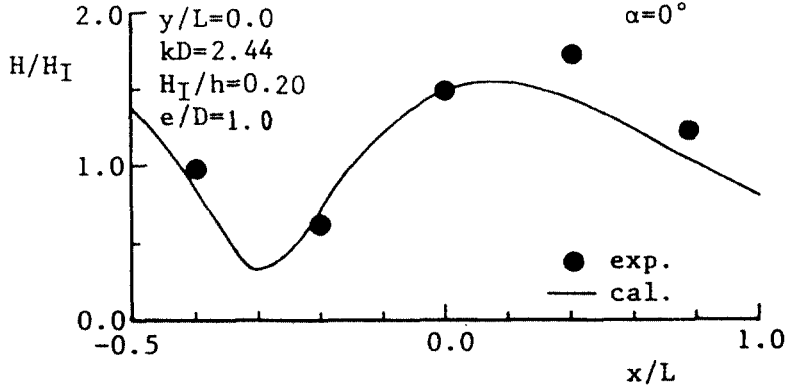


그림 6. 파고 분포의 비교 예 ($kD=2.44$, $H_I/h=0.20$)

식 (3.9), (3.10) 및 (3.11)로 부터 f 와 Re 수의 관계를 구하면 식 (3.12)처럼 된다.

$$f = \sqrt{2\pi/Re} \quad (3.12)$$

즉 마찰계수 f 는 Re 수의 1/2 제곱에 반비례한다.

4. 주변 파동장의 특성

4.1 파고의 변화

파고의 변화는 $e/D=\infty, 1$, $KD=2.44$, $\alpha=0$ 및 $H/h=0.2$ 만을 검토한다.

그림 4 및 5는 각각 수치 해석에 의해 계산한 단원통 구조물 및 복수원통 구조물의 경우의 등파고선도이다. 단원통 구조물의 경우에, 구조물 전면에서 생기는 최대 파고는 입사 파고의 1.4배 정도이지만 복수원통 구조물의 경우에는 KD 나 입사 각도에 따라서 다르겠지만, 최대 파고는 입사 파고의 1.6배 정도까지 증대하며 파고의 변화가 크다. 그리고 전체적으로 구조물 배후에서의 파고 변화는 전면의 변화에 비해서 작다.

그림 6은 계산치와 실험치를 비교한 결과이다. 계산치와 실험치의 대응은 무척 양호하며, 이 연구에 있어서의 계산법의 타당성이 확인됨과 동시에 수치해석 결과에 의해, 파고 변화의 개략치를 추산할 수 있음을 알 수 있다.

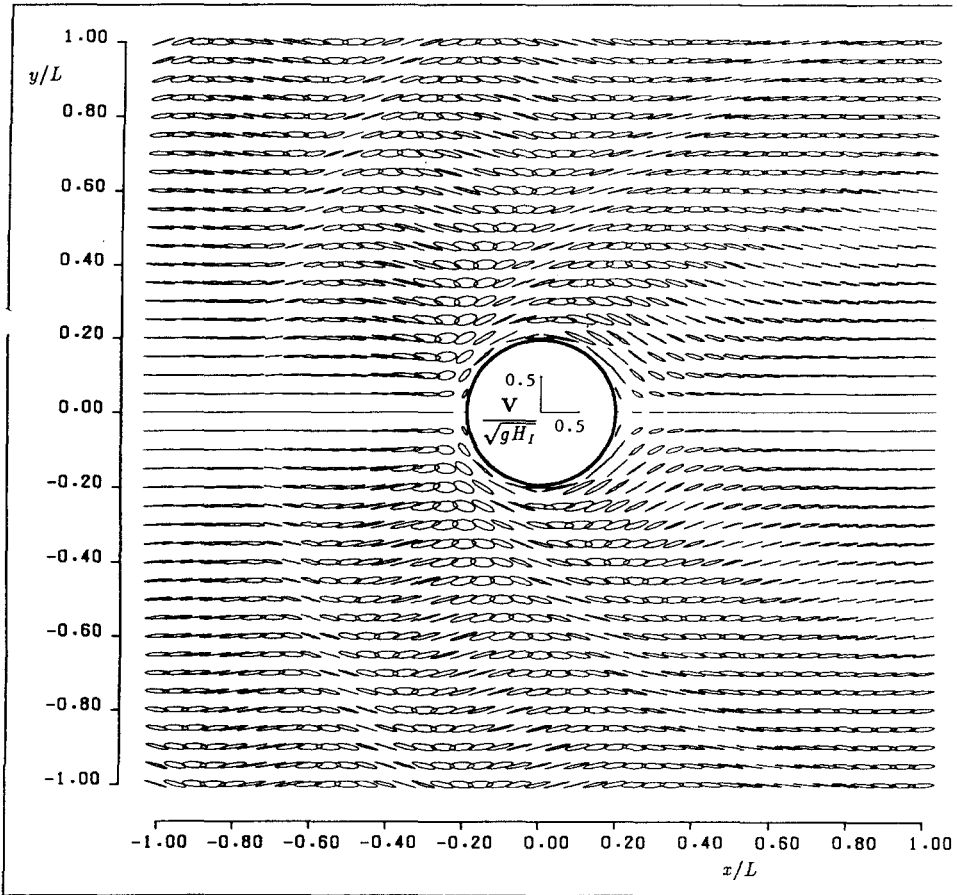


그림 7. 파 1 주기내의 무차원 유속 vector의 변화 특성

($kD=2.44$, $H_1/h=0.20$, $e/D=\infty$, $\alpha=0^\circ$)

4.2 유속의 특성

그림 7 및 8은 각각 수치해석에 의해 계산한 단원통 구조물 및 복수원통 구조물의 무차원 유속 vector의 파 1주기 내의 변동 특성을 나타낸다. 그림에서 파는 왼쪽에서 입사한다. 유속 vector 궤적이 크고 작은 장소가 번갈아 나타난다.

이것은 입사파와 회절파에 의해 형성되는 부분 증폭 파동장이 발달하기 때문이며 구조물 주변은 부분 증폭파에 강하게 지배됨을 나타낸다.

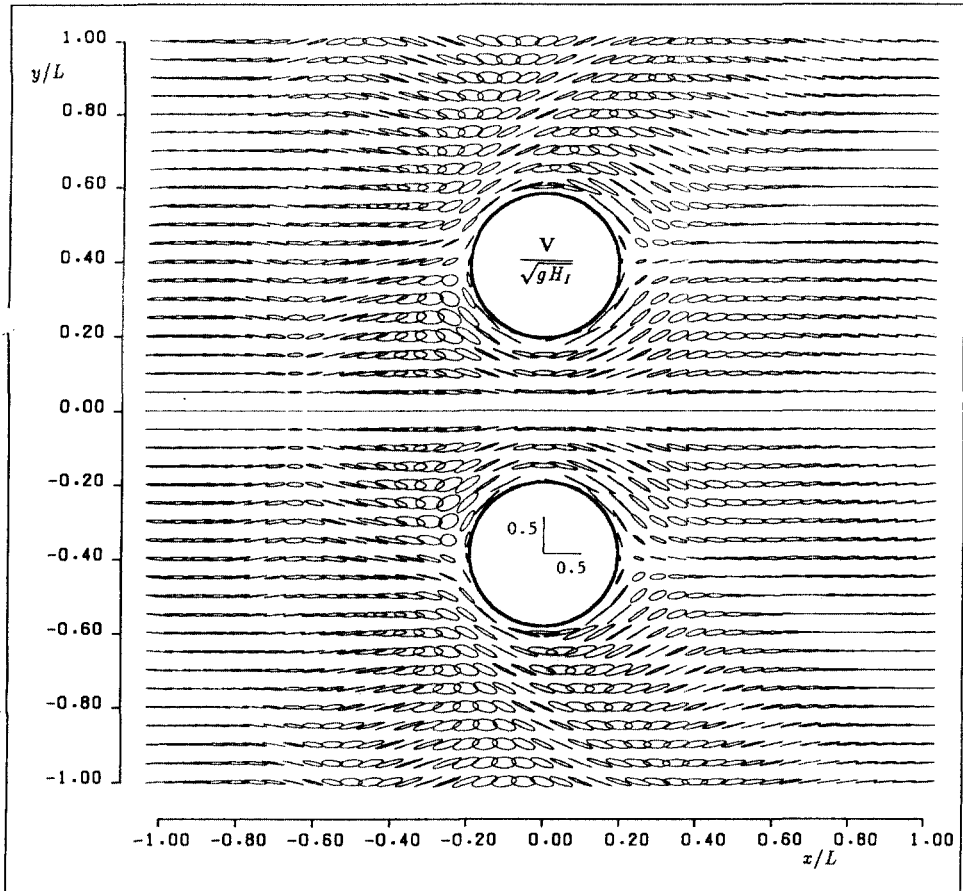
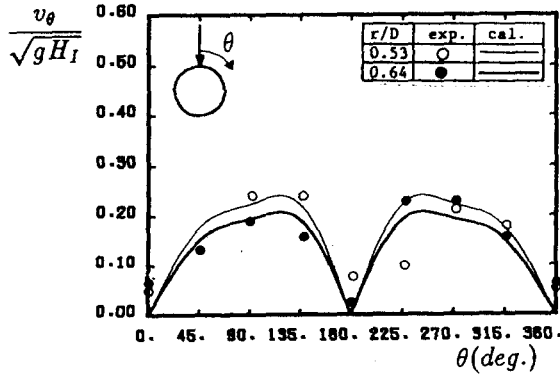


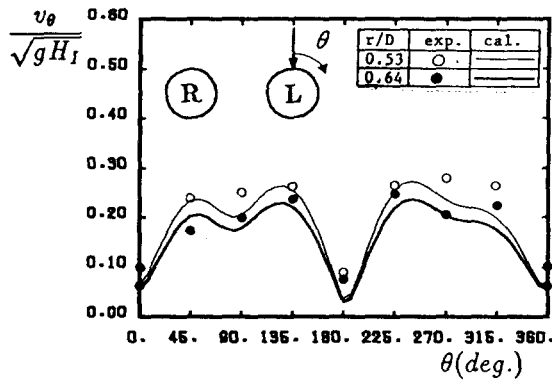
그림 8. 파 1 주기내의 무차원 유속 vector의 변화 특성
 ($KD=2.44$, $H_1/h=0.20$, $e/D=1.0$, $\alpha=0^\circ$)

5. 저면 전단력의 특성

구조물의 근방에서는 구조물 표면의 불투과 조건에 의해 저면 전단력에 대한 반경 방향의 수립자의 운동의 기여는 작다고 판단할 수 있기 때문에 접선 방향의 유속만을, $e/D=\infty, 1$, $KD=2.44$, $\alpha=0$ 및 $H/h=0.2, 0.75$ (碎波)의 경우에 대해서 검토한다.



(a) $e/D = \infty$



(b) $e/D = 1.0$

그림 9. 접선 방향 무차원 유속의 변동 특성
($kD=2.44$, $H_I/h=0.20$, $\alpha=0^\circ$)

5.1 저면 유속의 특성

그림 9는 접선 방향 무차원 저면 최대 유속의 θ 에 따른 변동 특성을 나타낸다. 복수 원통 구조물의 경우에는, 파의 입사 방향을 나타내는 화살표가 있는 구조물에 대한 값을 나타내고 있다. 그리고 θ 는 파의 입사 방향으로 부터 시계 방향을 +로 한다. 단원 통 구조물의 경우는 $\theta=0^\circ$ 에 대해서 대칭인 유속 분포이지만 복수원통 구조물의 경우에는 대칭성이 없어진다. 이 경우, 축류 효과에 의해 구조물이 서로 마주보는 쪽 (원 통 L의 경우 $\theta > 180^\circ$) 의 유속이 클 것이라고 예측되었지만 실제로는 구조물 간격이 가장 좁아지는 위치보다 파의 투과쪽으로 벗어나 $\theta=240^\circ$ 전후가 유속이 크게 된다. 계산치와 실험치의 대응은 전체적으로 양호하며 선형 이론에 기초한 계산 방법으로 저면 유속의 예측을 정교하게 행할 수 있다.

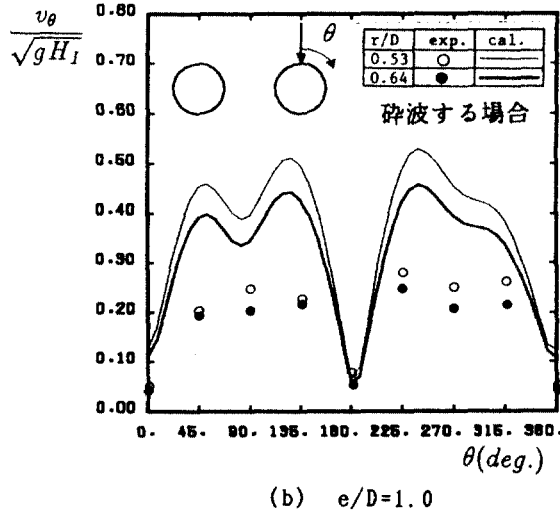
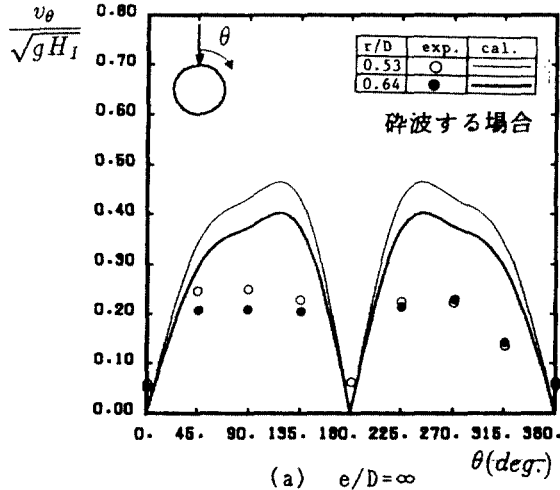
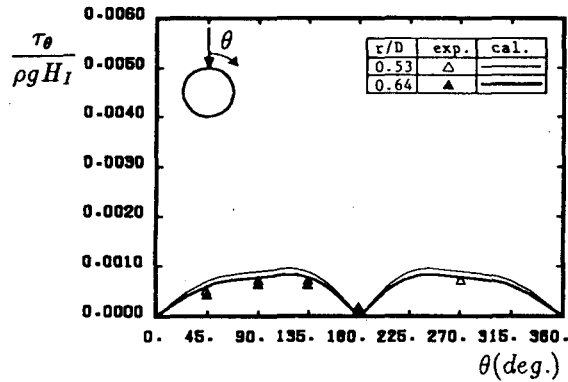
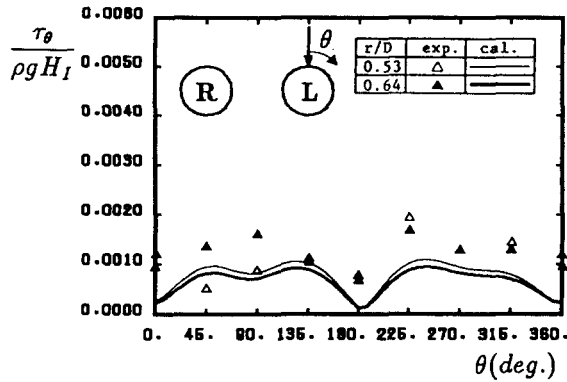


그림 10. 접선 방향 무차원 유속의 변동 특성
($kD=2.44$, $H_1/h=0.75$, $\alpha=0^\circ$)

그림 10은 쇄파의 경우의 접선 방향 무차원 저면 최대 유속이다. 실험치는 계산치보다 상당히 큼을 알 수 있다. 이것은, 쇄파 후에는 쇄파에 따른 에너지 손실 때문에 파고는 감소하고, 그리고 물 입자의 운동도 작아지지만 무차원화를 쇄파 전에 입사파 고로 하기 때문에 실험치가 작게 된다. 한편, 계산에서는, 쇄파는 발생하지 않고 파고 H_1 의 입사파가 그대로 비쇄파의 상태로 입사하는 경우의 값을 구하기 때문에 실험치를 크게 과대 평가하게 된다. 따라서 쇄파의 경우의 저면 유속장의 예측에는, 이 연구에서 이용한 계산법을 그대로 사용할 수 없게 된다.



(a) $e/D = \infty$

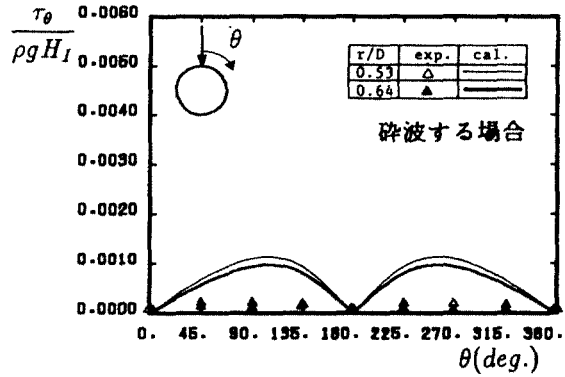


(b) $e/D = 1.0$

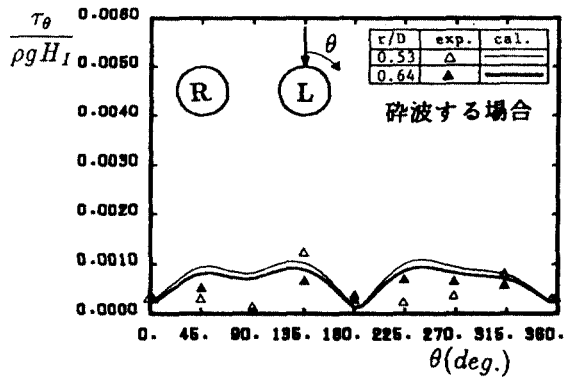
그림 11. 접선 방향 무차원 전단력의 변동 특성
($kD=2.44, H_I/h=0.20, \alpha=0^\circ$)

5.2 저면 전단력

그림 11은 접선 방향 무차원 전단력의 원주 방향의 변동 특성을 나타낸다. 무차원 저면 유속의 경우와 같이, 복수원통 구조물의 경우에는 파의 입사 방향을 나타내는 화살표가 있는 구조물에 대한 값이다. 저면 유속처럼, 단원통 구조물의 경우에는 $\theta=0^\circ$ 에 대해서 대칭인 전단력 분포로 되지만 복수원통 구조물의 경우에는 대칭성이 없어진다. 그리고 $\theta=240^\circ$ 전후에서 전단력이 크게 된다. 저면 유속과 비교하면 실험치가 많이 흩어지고 이론치보다도 약간 크게 되는 경향이 있지만 전체적으로는, 전단력의 변동 특성은 저면 유속의 경우와 비슷하다. 따라서, 선형 경계층이론으로 나타낼 수 있다고 할 수 있다.



(a) $e/D = \infty$



(b) $e/D = 1.0$

그림 12. 접선 방향 무차원 전단력의 변동 특성
($kD=2.44$, $H_I/h=0.75$, $\alpha=0^\circ$)

그림 12는 쇄파할 때의 접선 방향 무차원 전단력이다. 실험치는 계산치보다 상당히 작다. 이것은 앞에서 설명했듯이, 실험에서는 쇄파에 의해 파고와 수립자의 운동이 모두 작아지는데 비해 계산치에는 이런 효과가 포함되어 있지 않기 때문이다. 구조물이 서로 마주보는 쪽의 전단력 실험치는 저면 유속의 실험치에 비해서 바깥쪽의 값보다도 약간 커지는 경향은 있지만 이 점에 대해서는 선형 이론으로는 표현할 수 없는 현상이 일어나고 있는지 또는 계속에 포함된 오차에 의한 것인지 더욱 상세한 계측을 하여 검토할 필요가 있다.

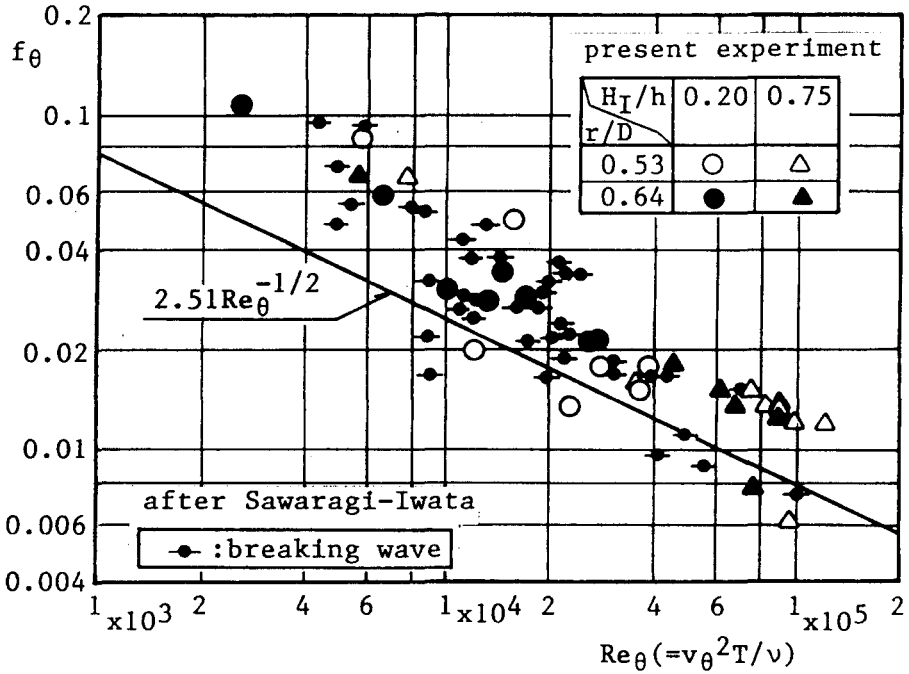


그림 13. 접선 방향 마찰 계수와 Reynolds 수의 관계의 예
($kD=2.44$, $\alpha=0^\circ$)

5.3 저면 마찰력 계수

그림 13은 접선 방향의 저면 마찰 계수와 파에 관한 Re수의 관계를 나타낸다. 그림에는, 선형 층류 경계층 이론에 의한 이론치를 실선으로 하고, 岩田⁸⁾의 진행파의 쇠파에 의한 저면 마찰 계수의 실험치도 함께 나타내고 있다. 실험치는 이론치에 비해서 최대 약 2배 정도 크다. 이 원인으로서서는 전단력계의 표면은 거울면처럼 매끄럽지 않으며 무척 작은 요철이 존재하여, 이 때문에 전단력이 커진 점, 그리고 이 연구에서 채용한 이론해는 반드시 실험의 실태와 맞지는 않는다는 점 등의 요인을 들 수 있다. 또한 대구경 원통 구조물 주변의 경계층 이론에 관해서는 아직 검토해야 할 여지가 많이 남아 있다고 할 수 있다.

6. 결 론

대구경 복수원통 구조물 주변의 저면 전단력 특성을 수리실험과 수치해석 결과에 기초하여 검토하였다. 이상을 정리하여 요약하면 다음과 같다.

- 1) 복수원통 구조물의 경우, 구조물 전면에서의 파고의 증가는 단원통 구조물의 경우보다 크다.
- 2) 복수원통 구조물의 경우, 구조물 사이의 흐름의 축류 효과는 작으며, 구조물 주변의 파동장은 입사파와 구조물로 부터의 회절파에 의해 형성되는 부분 중복 파동장에 크게 지배된다.
- 3) Re수에 따르는 저면 유속의 변화 특성은 층류 경계층 이론과 무척 비슷하다.
- 4) 이론과 실험 모두 저면 전단력은 저면 유속과 거의 동위상이다.
- 5) 선형 이론으로 저면 전단력의 특성을 어느 정도 평가할 수 있지만, 비선형 이론으로의 확장 및 층류 경계층 이론의 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) 岩田好一朗, 水谷法美, 安部智彦 : 波による取水塔周辺波動場の特性に関する研究, 名古屋大学工学部土木工学教室報告書, 1992.
- 2) 水口優, 小島匡人, 小宮山正二, 佐藤忍 : 波動による小口径円柱周りの局所洗掘に関する実験的研究, 第 32 回海岸工学論文集, 1985, pp. 430-434.
- 3) 東江隆夫, 勝井秀博 : 大口径円柱周辺の洗掘現象, 第 32 回海岸工学論文集, 1985, pp. 425-429.
- 4) 中村孝幸, 奥吉雄 : 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, 第 32 回海岸工学論文集, 1985, pp. 594-598.
- 5) Issacson, M. Q. : Vertical cylinders of arbitrary section in wave, J. of Waterway, Coastal and Ocean Eng. Division, ASCE, Vol.104, No. WW4(1978), pp. 309-322.
- 6) John, F. : On the motions of floating bodies II, Comm. Pure Appl. Math., Vol.3, 1950, pp. 45-101.
- 7) 岩垣雄一, 榎木亨 : 海岸工学, 共立出版(1979), pp. 83-85.

- 8) 榎木亨, 岩田好一朗, 松本昇 : 砕波後の波の底面摩擦力に関する実験的研究 - 砕波の内部機構に関する基礎的研究第 4 報 -, 第 21 回海岸工学論文集, 1974 pp. 33-38.