

우각부 방파제의 안전성에 영향을 미치는 수리학적 거동

김 성 덕

청주대학교 토목환경공학과
(2008. 6. 13. 접수 / 2008. 8. 20. 채택)

Hydraulic Behavior Affecting the Safety of Reflected Breakwater

Sung Duk Kim

Department of Civil and Environmental Engineering, Cheongju University
(Received June 13, 2008 / Accepted August 20, 2008)

Abstract : A reflected breakwater can be affected by wave pressure and power because it is to be concentrated by wave energy. The present study is to estimate hydraulic behavior affecting around a reflected breakwater, which is discontinuity cases and various angle of coner at the breakwater. The numerical model to investigate wave diffraction, which is important hydraulic factor in the ocean, is performed by using direct boundary element method. The present numerical results are compared with the solutions of approximate and absolute based on an eigenfunction, and the solution of analytical by Fresnel integral. The results of the present numerical simulation agreed well with those of the published numerical and analytical data. As a result of this study, wave height is high at the corner of breakwater, and it is to be high if angle of conner at the reflected breakwater is small.

Key Words : reflected breakwater, hydraulic behavior, wave diffraction, direct boundary element method, eigenfunction, fresnel integral

1. 서론

우각부를 갖는 방파제는 파랑의 집중현상을 유발하여 파랑에너지가 집중된다. 이는 보다 큰 파압과 파력이 제간부의 안전성에 영향을 미칠 수 있는 요인이 된다. 또한, 우각부 방파제는 파랑의 입사방향에 대하여 입사파와 반사파의 간섭 등으로 인하여 일직선상 방파제의 경우에 비하여 파고가 보다 더 높아 질 수 있다. 이것은 바로 방파제에 작용하는 파력이나 파압을 증대시키는 요인이 되며, 방파제의 안전성에 영향을 준다. 따라서 우각부를 갖는 방파제의 경우에 대하여 방파제 전면에서의 안전성에 영향을 미치는 파고의 예측을 신중히 검토할 필요가 있다.

일직선상의 방파제에 대한 파랑의 회절이나 반사 등의 예측은 Sommerfeld의 해를 도입한 Penny와 Price¹⁾의 이론에 의하여 구할 수 있다. 방파제의 우각부에 대한 검토를 위하여, 유한한 길이의 방파제 전면에서의 반사율 제어 등을 적용한 小丹와 大²⁾와 角野 등³⁾이 연구하였던 결과들과 비교하여 본

연구의 수치모델을 검증하였다.

小丹와 大²⁾ 및 角野 등³⁾의 기본 이론식은 Green 정리를 이용하여 경계적분방정식을 사용한 규칙파의 결과이다. 엄밀하게 두 연구 간의 차이를 조사하면, 小丹와 大²⁾은 임의의 형상에 대한 항만내의 장주기 공진현상을 조사하기 위하여 사용한 Lee⁴⁾의 연구와 같은 직접법을 사용한 경계적분방정식이고, 角野 등³⁾은 Barrailer Gaillard⁵⁾에 의한 항만내 파고 분포나 방파제에 의한 회절파고에 대한 연구와 같은 간접법을 사용하는 경계적분방정식이다.

본 연구에서는 직접법을 이용한 경계적분방정식을 기본으로 하여, 임의의 평면형태의 우각부 방파제 전면에서의 반사율을 임의의 비율로서 고려할 수 있는 수치모델을 개발하고, 검증한다. 또한, 우각부의 각도 변화 및 다양한 입사파 방향에 따른 방파제 전면 및 배후면 부근에서의 방파제 안전성에 영향을 미치는 회절파고의 예측을 규칙파랑으로 그 결과를 나타내기로 한다.

2. 이론

2.1. 지배방정식

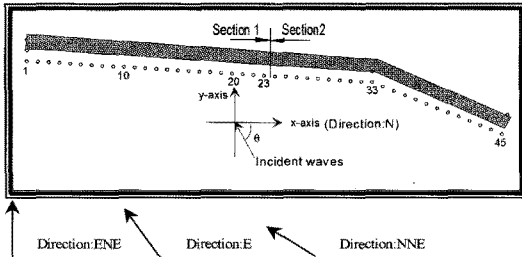


Fig. 1. Definition sketch of front face of a reflected breakwater and calculating points from 1 to 45.

우각부를 갖는 방파제의 전면에 수심 h 인 곳에 규칙파가 입사하는 것을 가정한다. 정수면상에 x , y 축, 그리고 연직상향으로 z 축을 취한다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 방파제의 주위를 S 로 나타낸다. 방파제의 전면은 유공블럭이나 소파구조물이 설치되어 있는 반사율 Kr 을 갖는 것으로 한다. 숫자 1~45는 방파제 전면에서의 계산지점을 나타낸다.

유체의 성질을 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동을 비회전성으로 가정하면 식 (1)의 속도 포텐셜이 존재하고, 이것은 식 (2)와 같이 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\Phi(x,y,z,t) = \phi(x,y,z)e^{-i\omega t} \quad (1)$$

여기서, σ 는 각주파수($=2\pi/T$, T 는 주기), t 는 시간이다. 또한 $\phi(x,y,z)$ 는 시간과 독립인 공간 속도 포텐셜이다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

속도포텐셜의 해를 구하기 위하여 다음과 같이 경계조건을 설정한다.

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right)_{z=0} + g\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \alpha k \phi = 0 \quad (5)$$

가 된다. 여기서, g 는 중력가속도, α 는 복소투과계수(complex transmission coefficient)이다(Isaacson과 Qu⁶⁾. 위의 경계조건을 만족하는 속도포텐셜의 일

반해는 다음과 같이 얻어진다.

$$\phi(x,y,z) = \frac{ga_i}{\sigma} \cdot f(x,y) \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \quad (6)$$

a_i 는 입사파의 진폭, k 는 파수($2\pi/L$, L 은 파장)이고, 식 (7)의 분산관계식으로 부터 구할 수 있다.

$$kh \tanh(kh) = \sigma^2 h/g \quad (7)$$

또한, $f(x,y)$ 는 입사파, 반사파 및 산란파를 표시하는 파동함수이다. 이 파동함수를 각각의 성분으로 나타내면, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x,y) = f_i(x,y) + f_r(x,y) + f_s(x,y) \quad (8)$$

여기서 입사파와 반사파는 다음과 같다.

$$f_i(x,y) = -ie^{-ik(x\cos\theta + y\sin\theta)} \quad (9)$$

$$f_r(x,y) = -ie^{-ik(x\cos\theta - y\sin\theta)} \quad (10)$$

따라서, 산란에 의한 산란파 파동함수를 구하면 방파제에 의한 회절, 반사등을 구할 수 있게 된다.

회절영역의 임의의 지점(x,y)에서의 $f_s(x,y)$ 는 Green 제2정리를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_s(x,y) = \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial f_s}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) - f_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) \right] d\Gamma \quad (11)$$

한편, 한 점(x,y)가 방파제의 경계선상으로 접근하면 점(x,y)는 점(ξ,η)가 되므로 그때의 $f_s(x,y)$ 는 다음과 같이 된다(Lee⁴⁾, Lee⁷⁾.

$$f_s(x,y) = \int_{\Gamma} \left[f_s(\xi,\eta) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(kr) \right) - \left(-\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(kr) \right) \cdot \frac{\partial}{\partial n} f_s(\xi,\eta) \right] ds \quad (12)$$

반사율 Kr 을 고려하면 식 (11) 및 식 (12)는 다음과 같이 된다(小丹와 大里²⁾, Lee와 Williams⁸⁾.

$$f_s(x,y) = \int_{S_L} \left[\frac{\partial f_s}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) - Kr f_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \right) \right] d\Gamma \quad (13)$$

$$f_s(x,y) = -\frac{1}{2} \int_s \left[f_s(\xi,\eta) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(kr) \right) - Kr \cdot \frac{\partial}{\partial n} f_s(\xi,\eta) \right] ds \quad (14)$$

여기서, (ξ,η) 는 경계선 S 상의 점의 좌표, $\partial/\partial n$ 은 Fig. 1에 표시한 위치의 법선 방향의 도함수, $H_0^{(1)}(kr)$ 은 제 1종 0차의 Hankel 함수이다. 또한, r은 내역의 임의 지점(x,y)와 경계상의 (ξ,η) 점와의 거리로서 식 (15)로 주어진다.

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \quad (15)$$

결국, 파의 산란항인 $f_s = f_s(\xi,\eta)$ 의 값을 결정하여 회절계수(wave diffraction)로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 회절계수 또는 회절파고비는 방파제 설계시 안전설계파고 산정에 기여할 수 있는 수리학적 인자이다.

$$K_d = |f_s(x,y) + f_s(x,y)| \quad (16)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 수치모델의 검증

본 연구에서 사용한 수치모형은 방파제가 해안에 건설될 때 방파제(혹은 구조물)의 형상을 임의로 설정할 수 있고, 임의의 평면 형태에 대하여 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 소파블록이나 유공방파제 등의 설치로 방파제(구조물) 경계에서 반사율의 변화가 발생할 때 임의의 값을 줄 수 있으며, 더 나아가 방파제의 구간별로 서로 다른 반사율을 줄 수도 있다. 따라서, 본 연구 수치모형의 검증은 위하여 小丹과 大里²⁾의 연구결과와 비교 및 검증을 실시하였다. 小丹과 大里²⁾가 사용한 이론은 고유함수의 수치해 및 엄밀해, 그리고 Fresnel적분의 해석해(Analytical solution)로서 3종류의 해법을 사용하였다. 小丹과 大里²⁾는 일직선상의 완전반사를 하는 직립방파제에 있어서 방파제 길이 $B/L = 3.0(L: \text{입사파장})$ 에 대하여 30°, 60°, 90°의 입사각으로 입사시킨 경우에 방파제전면에서 회절 파고를 조사하였다.

Fig. 2는 입사각도가 90°인 경우를 나타낸다. Fig. 2에서 보면 직립 방파제 전면에서 완전반사에 의해 중복파가 형성되고 회절 파고비 K_d 는 2.0의 값을 기준으로 증감을 나타내고 있다. 또한, 방파제의 중앙점을 기준으로 대칭형을 나타내고 있다. 본 연

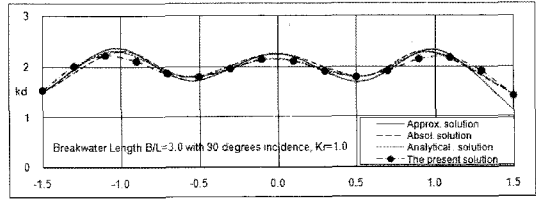


Fig. 2. Comparison of the present numerical study with approximate and absolute solutions(straight break-water; $B/L = 3.0$, $\theta = 90^\circ$, $Kr = 1.0$).

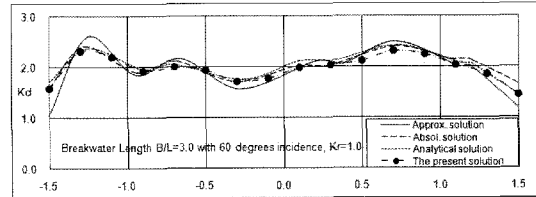


Fig. 3. Comparison of the present numerical study with approximate and absolute solutions(straight break-water; $B/L = 3.0$, $\theta = 60^\circ$, $Kr = 1.0$).

구예결과는 ● symbol을 사용하여 Fig. 2에 나타냈다. 본 연구의 결과와 小丹과 大里²⁾의 결과와 비교·분석한 결과, 매우 탁월한 일치율을 보이고 있다.

Fig. 3은 입사각도가 60°인 경우이며, 방파제 전면에서는 완전중복파에서 경사중복파로 형성되기 때문에 방파제 안전 설계에 영향을 미치는 회절 파고비가 90°인 경우보다 높게 형성되었다. 즉, K_d 값은 2.0을 중심으로 높고 방파제 중앙 부근에서 낮은 회절 파고비가 나타나고 있지만, 방파제 전면 좌측과 우측에서는 큰 회절 파고비를 나타냈다.

본 연구의 결과를 비교·분석한 결과, 입사각 60°의 경우에도, 매우 탁월한 일치율을 보이고 있고, 경사각의 입사각에도 적용 가능한 모형을 나타내 주고 있다.

입사각 30°의 경우도 동일한 조건으로 조사하였다. 입사각이 작을수록 경사중복파 형성에 따라 파형경사가 증가하는 등, 파고비는 방파제전면의 좌우 양측에 1.5배의 차이를 나타내고 있음을 보여주

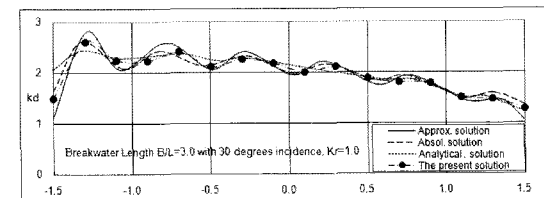


Fig. 4. Comparison of the present numerical study with approximate and absolute solutions(straight break-water; $B/L = 3.0$, $\theta = 30^\circ$, $Kr = 1.0$).

고 있다(Fig. 4). 이는 입사각도가 작을수록 방파제의 좌측부근에서 안전성에 영향을 미치는 회절 파고비 값이 높게 나타난다는 것을 의미한다. 이 경우에도, 小丹와 大里²⁾의 연구결과와 매우 일치하고 있다.

위 그림들에서 보면, 방파제 전면이 완전반사($Kr=1.0$)인 경우 직선상의 방파제에 대하여 본 연구의 수치모델과 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 따라서, 본 연구의 수치모형은 직선상의 방파제 경우나 모든 입사각에 대하여 정도 높게 활용할 수 있다.

3.2. 우각부 각도 변화에 따른 결과분석

우각부 방파제 제체각의 변화에 따른 방파제 전면에서 방파제 안전성에 영향을 미치는 회절 파고비를 조사하였다. 계산조건은 방파제 전면에서의 반사율 $Kr=0.8$ 로 하고 우각부를 중심으로 양측의 길이를 동일하게 2파장($B/L=2.0$)의 구조물로 하였다. 또한 규칙파랑의 입사각은 3가지 경우($45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)로 하였다. Fig. 5(a), (b), (c)는 각각 우각부 방파제 제체각이 $160^\circ, 135^\circ, 120^\circ$ 인 경우의 방파제 전면에서의 파고분포를 나타낸다.

Fig. 5(a)는 우각부의 제체각이 160° 인 경우이다. 이 경우 135° 와 120° 인 경우보다 완만한 파고분포를 나타냈다. 즉, 회절 파고비가 1~2를 나타냈고, 파고비의 차이가 3가지 제체각의 경우 중 가장 낮게 나타났다. 입사방향에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다.

Fig. 5(b)는 우각부의 제체각이 135° 인 경우이다. 이 경우 제체각이 120° 인 경우보다 완만한 파고분포를 나타내지만, 우각부 Coner 부근을 기점으로 45° 입사인 경우 좌측 부분에서 파고비의 증폭률이 우측보다 높게 나타났고, 입사각이 90° 인 경우는 그 반대현상이 나타났다. 또한, 전반적으로 회절파고비가 1.0~3.0을 나타냈고, 그 차이는 제체각이 160° 인 경우보다 상당히 높게 나타났다.

Fig. 5(c)는 우각부의 제체각이 120° 인 경우의 파고분포를 나타낸다. 이 경우 방파제의 Coner 부근을 기점으로 좌우측 부분에서 파고비의 증폭률이 세 가지의 경우 중 높게 나타났고, 파고비의 차이도 제체각 중 가장 높은 비율을 나타냈다.

우각부 방파제의 제체각 변화에 따른 파고분포를 비교하면, 제체각이 작을수록 우각부 전면 부근에서의 회절 파고비의 증폭률과 회절 파고비가 높게 나타났고, 변곡점 부근에서의 파고비의 차이가

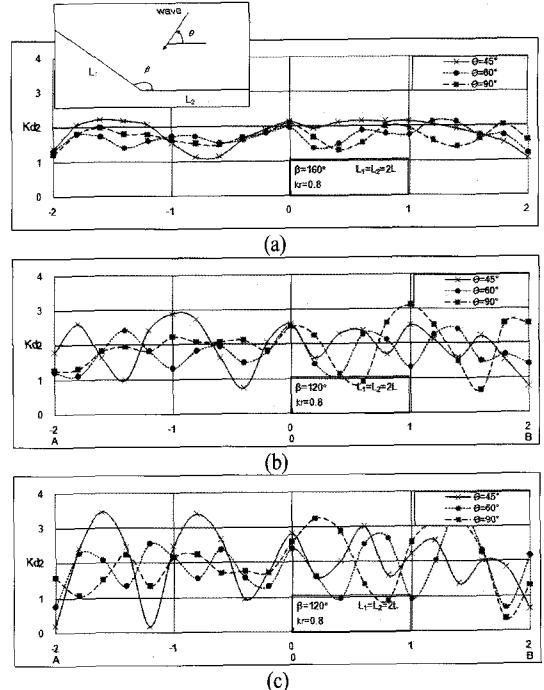


Fig. 5. Wave-height distributions($B/L=4.0, Kr=0.8$), (reflected angle of breakwater ; (a) 160° (b) 135° (c) 120°).

크게 나타났다. 이는 우각부 방파제 설치시 안전성을 확보하기 위하여 제체각이 작은 경우 소파제 또는 외해에서 파 에너지를 저감할 수 있는 방법을 적용해야 된다고 판단된다.

3.3. 우각부 전면에서의 파고분포(반사율)

반사율의 변화, 즉 소파제를 설치한 경우(부분반사)와 소파제를 설치하지 않은 경우(완전반사)에 따른 우각부 방파제 전면에서의 안전성에 영향을 미치는 회절 파고비를 조사하였다. 계산조건은 방파제 전면에서의 계산조건으로 반사율 $Kr=0.4$ 와 $Kr=1.0$ 으로 각각 취하고, 3방향의 입사파에 대하여 수치계산을 실시하였다. 또한, 우각부의 각도는 3.2절에서 제일 안정적으로 나타난 각도인 160° 로 설정하였다. x축의 격자번호 33번이 우각부를 나타내고 격자번호 33번 이후 45번까지는 굴절부 방파제를 나타낸다(Fig. 6).

Fig. 6은 우각부 전면 소파제를 설치한 경우이다. Fig. 6에서 보면 우각부(No. 33)에서 방파제 안전성에 영향을 미치는 회절 파고비가 높게 나타났고, E방향과 ENE방향의 입사파가 NNE 방향 입사파보다 파고비가 높게 나타났다. 이는 우각부 부근에서 파랑이 굴절되면서 파고의 증폭이 증대되었

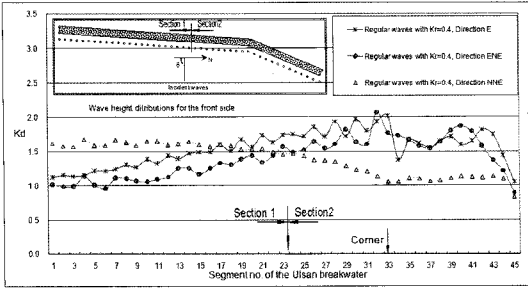


Fig. 6. Wave-height distributions of regular waves at the front face of a refracted breakwater with $Kr=0.4$.

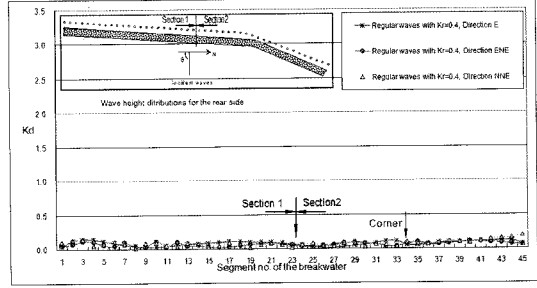


Fig. 9. Wave-height distributions of regular waves at the rear face of a refracted breakwater with $Kr=0.4$.

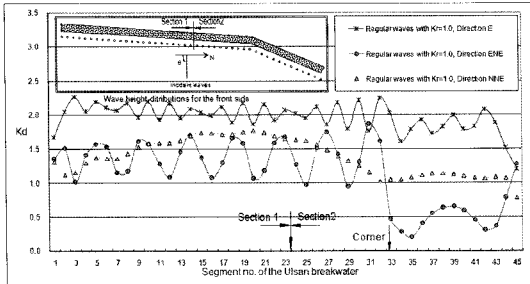


Fig. 7. Wave-height distributions of regular waves at the front face of a refracted breakwater with $Kr=1.0$.

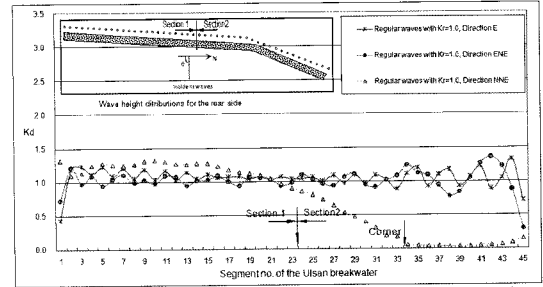


Fig. 10. Wave-height distributions of regular waves at the rear face of a refracted breakwater with $Kr=1.0$.

기 때문이다. 이 경우 회절 파고비가 1.0이상 최대 2.0까지 분포하였다.

Fig. 7은 우각부 전면에서 소파제를 설치하지 않은 경우이다. Fig. 7에서 보면 소파제를 설치한 경우보다 방파제의 안전성에 영향을 미치는 회절 파고비가 상당히 높게 나타났고, 우각부(No. 33) 지점에서의 변곡점이 나타났으며 파고의 증감이 상당히 크게 나타났다. 이는 소파제가 있는 경우보다 우각부 방파제의 안전성 확보가 어렵게 된다는 것을 의미한다.

3.4. 우각부 배후면에서의 파고분포(반사율)

반사율의 변화에 따른 우각부 방파제 배후면에서의 회절 파고비를 조사하였다. 계산조건은 방파제 배후면에서 반사율 $Kr=0.4$ 와 $Kr=1.0$ 으로 각각 취하고, 3방향의 입사파에 대하여 수치계산을

실시하였다. 계산지점은 우각부 배후의 “○”로 표시하였다(Fig. 8).

Fig. 9는 우각부 배후면에 소파제를 설치한 경우이다. Fig. 9에서 보면 방파제에 의한 파랑 제어로 전반적으로 낮은 파고를 형성하지만, 우각부(No. 34)을 기점으로 우측 부근에서 파고가 약간 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 우각부 배후면에 소파제를 설치하지 않은 경우이다. Fig. 10에서 보면 소파제를 설치한 경우보다 배후면에서의 회절파고비가 높게 나타났다. E방향과 ENE방향에서 파고의 증폭률이 높게 나타났으며, NNE방향에서는 우각부(No. 33)에서 변곡점의 차이가 크게 나타났다. 이는 우각부 부근에서 회절 파고비의 차이가 크게 나타나며, 안전성에도 영향을 미친다는 것을 발견할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 외해에서 파랑이 입사할 때 우각부를 갖는 방파제에 영향을 미치는 수리학적 거동, 즉 회절 파고비를 조사하였다. 우선, 본 연구의 수치모형을 小丹와 大里²⁾의 수치해, 엄밀해 및 해석해와 비교 검토하였고, 그 결과는 잘 일치하였다. 우각부 방파제의 제체각 변화에 따른 파고분포를 비교

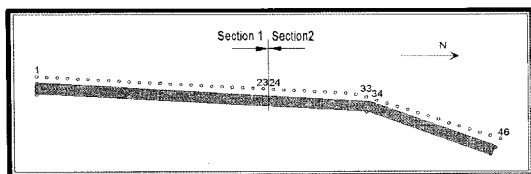


Fig. 8. Definition sketch of rear face of a reflected breakwater and calculating points from 1 to 46.

하면, 제체각이 작을수록 우각부 부근에서 회절 파고비의 증폭률이 높게 나타났고, 이는 우각부방파제의 안전성에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

우각부 방파제 전면 및 배후면에서 소파제가 설치된 경우에도 방파제 전면에서는 회절파고비가 크게 나타났고, 배후면에서도 우각점 부근에서 약간의 파고 증폭이 나타났다. 소파제가 설치되지 않은 경우는 상당히 높은 회절 파고비의 증폭이 나타났고, 변곡점에서의 증폭률의 차이가 크게 나타났다. 이 차이는 결국 방파제의 안전에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 우각부 방파제 설치시 제체각, 입사각 및 반사율에 따른 회절 파고비를 예측하는데 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 향후 우각부 방파제의 안전성을 확보하기 위하여 우각부 부근에 다량의 소파제를 설치하거나 외해에서의 파 에너지를 저감하는 설계에도 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) W.G. Penny and A.T. Price, "Diffraction of water waves by breakwaters," Misc. Weapons Development Technical History 26, Artificial Harbors, Sec. 3D, 1944.
- 2) 小丹浩治, 大里滄男, "防波堤隅角部附近の波高分布に関する研究", 港灣技術究報告書, 15卷, 第2号, pp. 55~88, 1976.
- 3) 角野昇八, 樋田操, 久保直, 小田一紀, 永井莊七郎, "隅角部を有する防波堤前面および沖合の波高分布", 第25回 海岸工学講演會論文集, 日本土木學會, pp. 108~112, 1978.
- 4) J.J. Lee, "Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry", J. of Fluid Mechanics, Vol. 45, pp. 375~394, 1971.
- 5) L. Barailler and P. Gaillard, "Evolution recente des modeles mathematiques d' agitation due a la houle : Calcul de la diffraction en profondeur non uniforme", La Houille Blanche., Vol. 22, No. 8, pp. 861~869, 1967.
- 6) M. Isaacson and S. Qu, "Waves in a harbor with partially reflecting boundaries", Coastal Engineering, Vol. 14, pp. 193~214, 1990.
- 7) H.S. Lee, "Boundary element modeling of multi-directional random wave diffraction by multiple rectangular submarine pits", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 28, No. 9, pp. 1149~1155, 2004.
- 8) H.S. Lee and A.N. Williams, "Boundary element modeling of multidirectional random waves in a harbor with partially reflecting boundaries", Ocean Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 39~58, 2002.