

半無限 防波堤주위에서의 不規則波 廻折에 대한 數值模型 A Numerical Model of Irregular Wave Diffraction around a Thin Semi-Infinite Breakwater

鄭信澤* · 蔡璋源* · 姜官秀* · 全仁植**

Shin Taek Jeong*, Jang Won Chae*, Kwan Soo Kang* and In Sik Chun**

要 旨 : 構造物에 의한 波浪의 廻折現象은 실제 현장에서 파랑상태를 분석하는 데 매우 중요한 요소이다. 그러나, 대부분의 경우 실제의 파랑을 不規則波 대신 單純波로 가정하고 있으나, 이 경우 Goda (1985)가 지적한 바와 같이 많은 오차를 포함할 수 있다. 不規則波를 계산하는 방법중 스펙트럼 計算法은 파랑을 週期와 方向이 다른 여러 개의 單純波로 분류하여 변형현상을 계산한 뒤, 다시 線形的으로 중첩하는 방법이다. 본 연구에서는 Chen(1987)이 제안한 單純波 模型을 이용하여 스펙트럼 계산법으로 不規則波의 廻折現象을 계산하였다. 그 결과는 Goda 등(1978)에 의한 半無限 防波堤에서의 廻折圖와 매우 비슷하다.

Abstract □ The phenomenon of wave diffraction due to structure is an important factor in the wave climate at the site. As an approximation, the propagation characteristics of a regular wave train are usually used, instead of those of irregular waves. However, there are great differences between the diffraction coefficients of the irregular waves and monochromatic waves, as shown by Goda (1985). The spectral calculation method, one of the methods to deal with the transformation of random sea waves, essentially consists of decomposing a spectrum of the irregular sea state into various monochromatic components, and assembling the component results by linear superposition. Monochromatic wave transformation model developed by Chen(1987) is used to make spectral calculation. These calculations agree closely with Goda *et al.* (1978)'s diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater.

1. 緒 論

深海中에서 발달된 波浪이 沿岸域으로 전파하는 경우, 水深, 흐름, 그리고 構造物 등에 의해 변형된다. 이러한 波浪의 變形 研究는 구조물의 設計波 算定 뿐만 아니라, 港内の 靜穩度 검토시에도 필요하며 이를 위해서는 短週期波의 淺水, 反射, 屈折 및 廻折에 의한 港内 變形을 파악하여야 한다.

防波堤 주위에서의 波의 廻折現象은 Penney와 Price(1952)가 Sommerfeld 解를 이용하여 처음 解析한 뒤, 그 결과는 오늘날에도 많이 이용되고 있다. Stoker(1957)는 이보다 더 일반화된 경우로서 임의의

각도를 갖는 vertical wedge 주위에서 파의 變形現象을 해석하였다. 그러나, 이 두 가지 방법은 모두 近似式을 사용하고 있다.

單純波의 屈折 및 廻折에 의한 변형을 계산하는 기본방정식은 Berkhoff(1972)에 의해 유도된 타원형 편미분방정식, 즉 緩傾斜方程式이다. 그러나, 이 방정식으로부터 解析解를 직접 구하기는 어렵기 때문에 有限要素法, 또는 有限差分法 등을 이용하여 解를 구하고 있다. 이러한 數值解法을 이용하는 경우, 대부분의 解를 구할 수 있고, 복잡한 형태의 港灣에도 적용할 수 있는 장점도 있으나, 모형에 따라서는 反射波를 고려할 수 없고, 계산시간이 많이 소요되며,

*韓國海洋研究所 沿岸工學研究室 (Coastal Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

**韓國海洋研究所 海洋工學研究室 (Ocean Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

계산된 波向이 처음 가정한 波浪의 主 進行方向으로 부터 크게 벗어나지 않아야 하는 등의 단점이 존재 한다. 대부분의 波浪變形 數值模型에 대한 연구는 單純波에 집중되어 그 精度 및 效率을 높이는 데 집중되어 왔으나, 최근 Panchang 等(1990)에 의해 水深變化를 고려한 단순파 모형을 不規則波에 적용하는 연구가 시도되고 있다.

현재 국내에서는 短週期 波浪의 解析에 주로 有義波法을 이용하고 있으나 이 경우 실제 현상과 큰 차이가 발생할 수 있다. 그 예로 최근 Vincent와 Briggs (1989)의 타원형 수중압초를 이용한 不規則 波浪變形 水理模型實驗 結果에 의하면 규칙파의 경우 불규칙 파보다 100% 과대 평가되기도 하고, 다른 지점에서는 50% 과소 평가되기도 한다. 한편, 방파제 배후에서의 파랑해석에 有義波法을 이용하는 경우 실제 파랑상태의 1/3 정도의 과고로 과소 평가된다(Goda, 1985).

日本の 경우, 防波堤 및 섬 등의 장애물에 의해 생기는 廻折波의 영향을 크게 받는다면 예측되는 영역내의 波高는 廻折圖, 廻折計算, 또는 水理模型實驗에 의하여 산정하며, 廻折波의 산정에서는 파의 스펙트럼 특성을 고려하는 것을 표준으로 하고 있다 (日本港灣協會, 1989). 이는 廻折現象에서 波向이 매우 중요하기 때문이다.

본 연구에서는 廻折現象이 우세한 防波堤 背後에서의 波高變化 分析을 위해 Chen(1987)에 의해 제안된 單純波 模型으로 각 成分波의 변형을 계산한 뒤, 이들 스펙트럼 결과를 중첩시켜 실제 현상에 근사하는 不規則 波浪을 계산하였다.

2. 單純波 模型

Wedge angle이 θ_0 , 양의 연직방향을 z 로 한 Fig. 1과 같은 원통형 좌표계(r, θ, z)를 이용하면 非壓縮性, 非回轉流의 運動은 다음과 같이 速度포텐셜 $\Phi(r, \theta, z, t)$ 의 Laplace 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

또한 有限水深에서 進行波의 運動 및 表面變位 η 는 다음과 같이 표현된다(Newman, 1977).

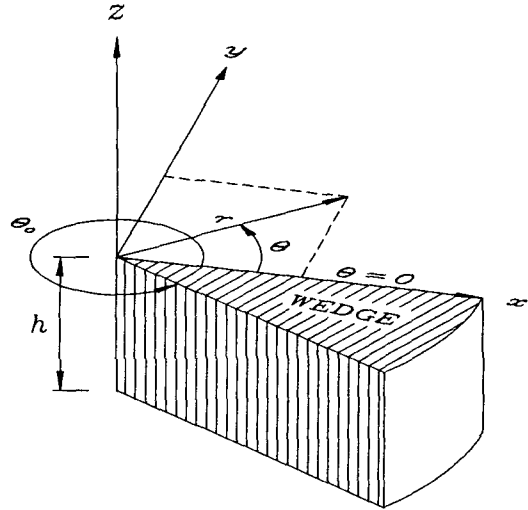


Fig. 1. A vertical wedge of arbitrary wedge angle.

$$\Phi(r, \theta, z, t) = A_0 \frac{\cosh k(zth)}{\cosh kh} \phi(r, \theta) e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$\eta(r, \theta, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = a_0 \phi(r, \theta) e^{i\omega t} \quad (3)$$

여기서,

- $A_0 = i g a_0 / \omega$
- $\omega =$ 角周波數
- $i = \sqrt{-1}$
- $g =$ 動力加速度
- $a_0 =$ 入射波 振幅
- $k =$ 波數
- $\phi =$ 速度 포텐셜의 水平成分

이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 Helmholtz 방정식을 얻을 수 있다.

$$r^2 \phi_{rr} + r \phi_r + \phi_{\theta\theta} + k^2 r^2 \phi = 0 \quad (4)$$

Chen(1987)은 Fig. 2와 같이 대상영역을 3개로 구분하여 식 (4)로부터 다음과 같은 解析解를 구하였다.

$$\phi(r, \theta) = \frac{2}{v} \left[J_0(kr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{in\theta} / 2\omega J_{n/v}(kr) \cos \frac{n\alpha}{v} \cos \frac{n\theta}{v} \right] \quad (5)$$

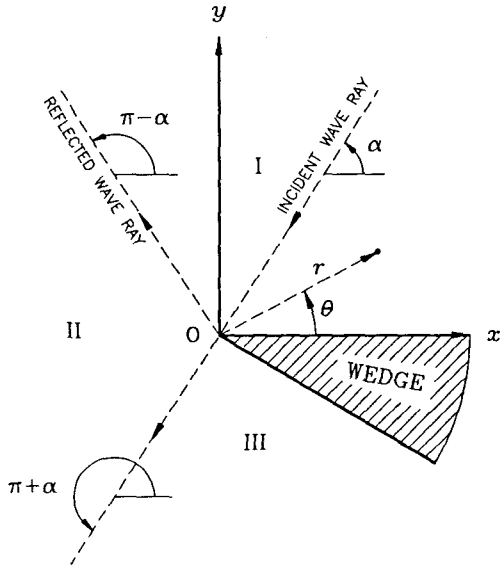


Fig. 2. Three subregions and the wedge.

여기서,

- J = 제 1종 Bessel 函數
- $v = \theta_0/\pi$
- $\alpha =$ 入射角

식 (5)는 Bessel 함수가 포함되어 있는 복잡한 형태로 전자계산기를 이용하여 계산할 수 있으며, 半無限 防波堤에 대해 Stoker(1957)가 제안한 식과 동일하다. 그러나, 당시에는 이 식을 계산하는 것이 불가능하였기 때문에 近似式을 이용하였다.

3. 不規則波의 計算

波浪의 變形 및 作用을 취급하는 方法에는 有義波法, 最大波法, 確率計算法, 不規則波 實驗法, 그리고 스펙트럼 계산법 등이 있다(Goda, 1985). 전자계산기의 발달과 함께 실용화되고 있는 스펙트럼 계산법은, 週期 및 波向이 다른 성분파의 변형을 계산한 뒤 이들을 합산하여 실제 파랑상태를 재현하는 방법으로 최근 Panchang 等(1990)에 의해 水深 變化를 고려한 단순과 數值模型을 不規則波 計算에 응용하는 적용성이 연구된 바 있다.

실제의 波浪은 無수한 成分波의 합으로 되어 있으며, 이 경우 파랑에너지는 周波數 뿐만 아니라 波向에

대해서도 분포하고 있으므로, 不規則波의 스펙트럼을 계산하기 위하여 input spectrum은 다음과 같이 2차원으로 가정하였다.

$$S_0(f, \theta) = S_0(f) G(f, \theta) \quad (6)$$

여기서,

$$S_0(f) = 0.25H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (7)$$

로 표현되는 Bretschneider-Mitsuyasu(B-M) 周波數 스펙트럼이며, 方向分布函數 $G(f, \theta)$ 는 Mitsuyasu 等(1975)이 제안한 식으로 다음과 같다.

$$G(f, \theta) = \left[\frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \right] \cos^{2s}(\theta/2) \quad (8)$$

$$s = \begin{cases} S_{max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \end{cases} \quad (9)$$

여기서,

- $\Gamma =$ gamma 函數
- $f_p =$ 尖頭 周波數 ($= 1/1.05T_{1/3}$)이며, $S_{max} = 10$ 은 風波, $S_{max} = 25$ 는 感쇠초기의 swell, $S_{max} = 75$ 는 swell性的 波에 해당한다.

特定 周波數 및 波向에서 入射波의 振幅 a_0 는 $[2S_0(f, \theta)\Delta f\Delta\theta]^{1/2}$ 이다. 각 성분파에 대한 진폭을 파랑변형 數值模型을 이용하여 계산한 뒤, 변형된 스펙트럼 $S(f, \theta)$ 는 다음 식에 의해 구한다(Chae and Jeong, 1992).

$$S(f, \theta) = [a/a_0]^2 S_0(f, \theta) \quad (10)$$

4. 模型 適用結果

單純波 數值模型을 이용하여 半無限 防波堤에서의 廻折圖를 圖示하면 Fig.3과 같다. 여기서 파랑의 主進行方向은 防波堤에 대해서 수직이고($\theta = 270^\circ$), 좌표는 有義波의 波長으로 無次元化시켰다. 單純波의 경우 防波堤 배후에서 波高比는 0에서 0.6까지 분포하며 방파제 끝부분에서는 波高比가 0.55 정도이다.

不規則波의 경우, 周波數 스펙트럼은 0.06 Hz에서 0.33 Hz까지($\Delta f = 0.01$ Hz), 方向分布函數는 主進行方向으로부터 -50° 에서 50° 까지($\Delta\theta = 10^\circ$) 각각 등간격으로 구분하여 308개의 성분파에 대해 계산을 실시하였으며 IBM PC 386-33으로 약 3시간 정도의

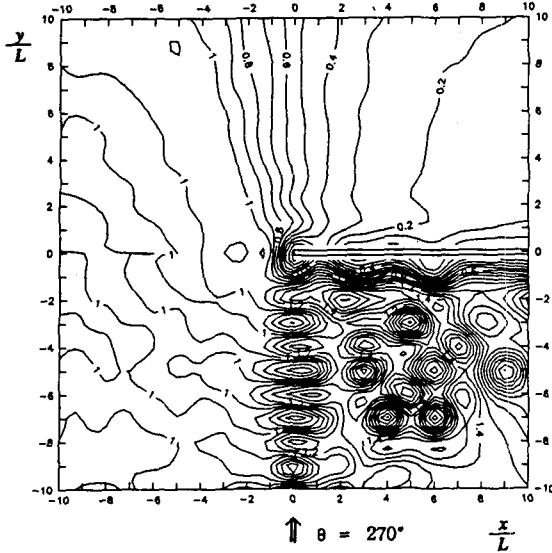


Fig. 3. Monochromatic wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=270^\circ$).

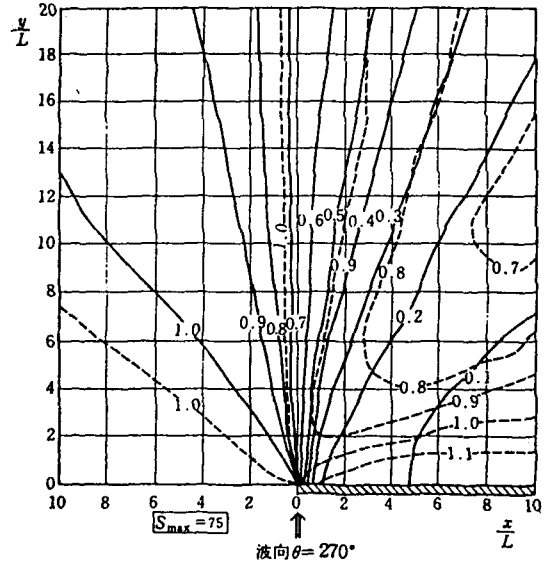


Fig. 5. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater by Goda *et al.* ($\theta=270^\circ$, $S_{max}=75$).

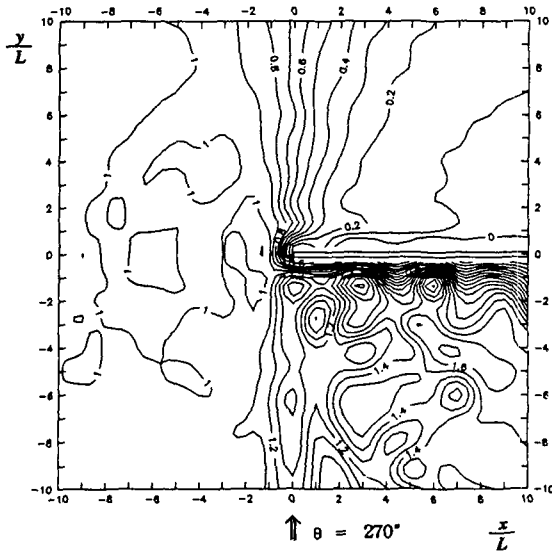


Fig. 4. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=270^\circ$, $S_{max}=75$).

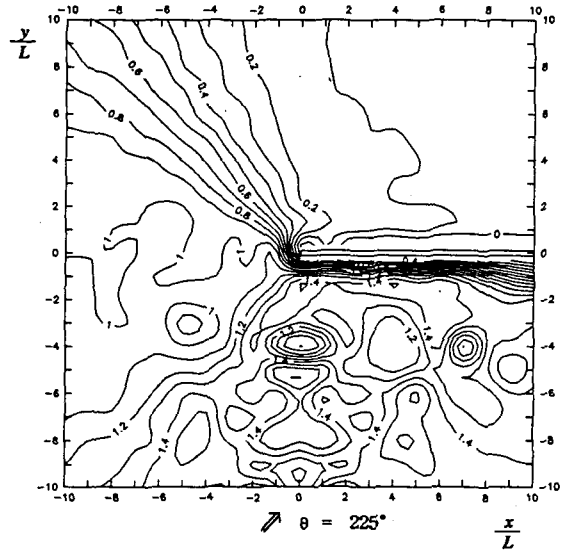


Fig. 6. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=225^\circ$, $S_{max}=75$).

계산시간이 소요되었다. Swell의 경우($S_{max}=75$), Fig. 4에 圖示한 바와 같이 방파제 背後에서의 波高比는 0에서 0.7까지 분포하며 방파제 끝부분의 波高比는 0.7로 단순파에 비해 상대적으로 크다. 특히, 波高比 0.1과 0.2는 단순파에 비해 큰 차이가 있음을 알 수

있다. Fig. 5의 실선은 동일한 경우에 대한 Goda 等 (1978)의 계산결과로 Fig. 4와 비슷하다.

Fig. 6~Fig. 9는 防波堤에 波가 비스듬히 입사하는 경우로 Swell과 風波($S_{max}=10$)에 대해 계산한 廻折圖로 모두 Goda 等(1978)의 결과와 비슷하다.

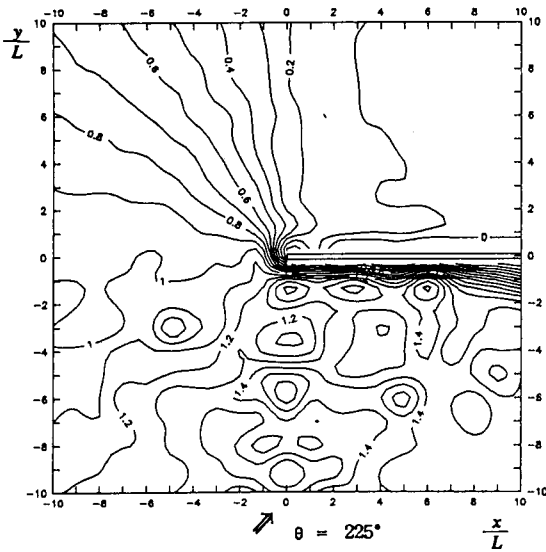


Fig. 7. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=225^\circ$, $S_{max}=10$).

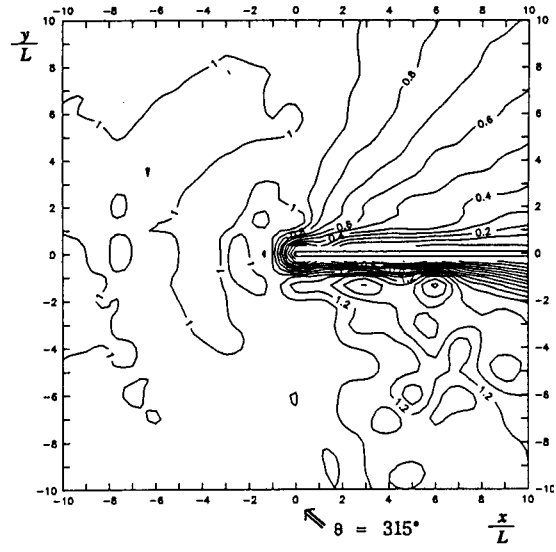


Fig. 9. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=315^\circ$, $S_{max}=10$).

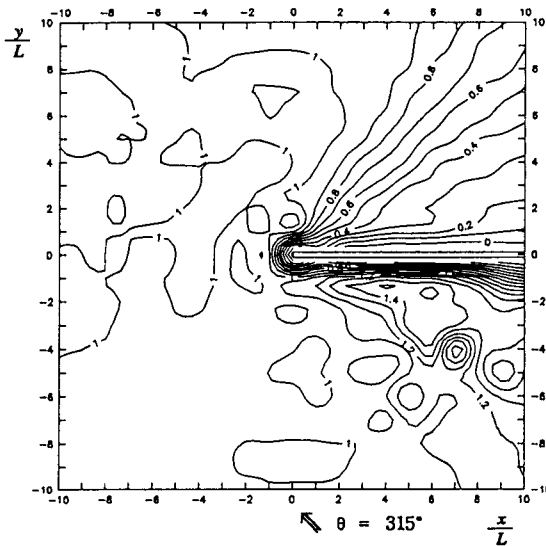


Fig. 8. Irregular wave diffraction diagram for a thin semi-infinite breakwater ($\theta=315^\circ$, $S_{max}=75$).

5. 結論 및 此後 研究課題

파랑의 廻折 및 反射를 계산할 수 있는 單純波 數值模型을 확장하여 不規則波의 廻折現象을 계산하였다. 波向 및 週期가 다양한 경우에 대해 단순파 모형을 이용하여 계산이 가능하면 非線形 效果가 거의 없다고 가정하여 不規則波의 廻折現象을 재현할 수

있으며 기존의 결과(例: Goda 等, 1978)와 매우 비슷한 廻折圖를 얻을 수 있다. 本研究를 통하여 얻은 結果 및 此後 研究課題를 요약하면 다음과 같다.

1. 單純波의 廻折現象에 대한 模型을 확장하여 不規則波의 廻折現象을 용이하게 재현하였다. 既存의 結果와 비슷할 뿐만 아니라, 防波堤 前面의 波高分布도 파악할 수 있다.

2. 港灣 計劃이나 확장시에 있어서 防波堤 背後에서의 波高는 單純波에 의한 결과와 不規則波에 의한 결과는 많은 차이가 있다. 따라서, 不規則波의 적용이 반드시 요구된다.

3. 실제 파랑의 상태에 따라서 方向分布函數가 크게 다르므로, 특정해역의 파랑상태를 재현하기 위해서는 대상해역의 波浪特性을 정확히 파악하여야 하며 이를 위해서는 波高 뿐만 아니라 波向 觀測이 필요하다.

4. 本 數值模型은 단순한 형태의 構造物에 대해서만 적용이 가능하다. 실제 복잡한 형태의 항만에 적용하기 위해서는 보다 효율적인 단순파 수치모형의 개발이 필요하다.

謝 辭

本 研究는 韓國海洋研究所의 1992年度 基本研究費에 의해서 遂行한 研究結果이다.

參考文獻

- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction and diffraction, Proc. 13th Conf. on Coastal Engineering, pp. 471-490.
- Chae, J.W. and Jeong, S.T., 1992. Current-depth refraction and diffraction model for irregular waves, 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering, pp. 197-198.
- Chen, H.S., 1987. Combined reflection and diffraction by a vertical wedge, Technical report CERC-87-16.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures, Univ. of Toyko Press, Japan.
- Goda, Y., *et al.*, 1978. Diffraction diagrams for directional random waves, Proc. 16th Conf. on Coastal Engineering, pp. 628-650.
- Mitsuyasu, H., *et al.*, 1975. Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *J. Geophys. Res.* **5**(4): pp. 750-760.
- Newman, J.N., 1977. Marine hydrodynamics. The MIT Press, Chap. 6.
- Panchang, V.G., Wei, G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg.* **116**(3): pp. 324-340.
- Penney, W.G. and Price, A.T., 1952. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters, *Philos. Trans. Roy. Soc. A*, **244**(882): pp. 236-253.
- Stoker, J.J., 1957. Water waves, Interscience Publishers, Chap. 5.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg.* **115**(2): pp. 269-284.
- 日本港灣協會, 1989. 港灣の施設の技術上の基準・同解説.