

## 불규칙파의 유공 케이슨 방파제로부터의 반사율 산정시 규칙파 모델 적용

서경덕\* · 손상영\*\*

### Application of a Regular Wave Model to Calculation of Irregular Wave Reflection from Perforated-Wall Caisson Breakwaters

Suh, Kyung Duck\* · Son, Sang Young\*\*

**Keywords :** Regular Waves(규칙파), Irregular Waves(불규칙파), Laboratory Experiments(수리실험), Wave Reflection(파의 반사), Perforated-Wall Caisson Breakwaters(유공 케이슨 방파제)

#### Abstract

Numerous studies have been performed to develop an analytical model that can predict the reflection of regular or irregular waves from a perforated-wall caisson breakwater. Though such irregular wave models as Suh et al. (2001) become available, regular wave models are still in extensive use because of their simplicity. In the present study, using the regular wave model of Fuggazza and Natale (1992), the reflection of irregular waves from a perforated-wall caisson breakwater was calculated in several different methods. First, the regular wave model was re-validated by the hydraulic model tests. Though the model somewhat over-predicted the reflection coefficients at larger values and under-predicted them at smaller values, overall agreement was pretty good between calculation and measurement. Then, the regular wave model was applied to calculate the irregular wave reflection in the experiments of Suh et al. (2001) and Bennett et al. (1992). In applying the regular wave model to irregular wave reflection, several different methods were used.

The results showed that it is the most reasonable to use the regular wave model repeatedly for each frequency component of the irregular wave spectrum with the root-mean-squared wave height for all the frequencies.

#### 1. 서론

유공 케이슨 방파제는 일반 직립 케이슨 방파제의 단점을 보완하기 위해 자주 사용된다. 유공 케이슨 방파제는 파랑의 반사뿐만 아니라 월파에 의한 파랑의 전달도 감소시켜주고 파력, 특히 케이슨에 작용하는 충격과압을 감소시켜준다. 이러한 유공 케이슨 방파제의 수리학적, 동수학적 특성을 파악하기 위해 많은 이론적 또는 실험적 연구가 이루어졌다.

유공 케이슨 방파제의 반사특성을 규명하기 위해 많은 수리 모형 실험이 실시되었다. Tanimoto et al. (1976)은 불규칙파가 사석 마운드 기초 위의 유공 케이슨 방파제에 수직으로 입사할 때의 반사특성을 알아보기 위해 수리실험을 실행하였다. 또한, Kakuno et al. (1992)은 마운드 기초가 없는 유공 케이슨 방파제에 대한 수리 실험을 수행하였다. 반면에 Park et al. (1993)은 사석 마운드 기초 위의 부분 유공 케이슨 방파제로부터의 파랑 반사특성을 실험적으로 조사하였다.

또한 반사계수를 예측할 수 있는 해석모형을 개발하기 위한 노력들도 많았다. Kondo (1979)는 선형 천해파 이론에 근거하여 한 개 또는 두 개의 유공벽을 가진 유공 케이슨 방파제에서의 반사 계수의 계산에 관한 해석모형을 개발하였다. Fuggazza and Natale (1992)는 여러 개의 유수실을 가진 유공 케이슨의 반사율에 대한 폐합해를 제안하였다. Kakuno et al.

(1992)은 정합 점근 전개법을 이용하여 한 개의 유수실을 가지는 유공 케이슨에서의 파의 반사를 예측하는 해석 모형을 개발하였다, 또한, Suh and Park (1995)은 사석 마운드 기초 위에 놓인 유공 케이슨에 대하여 임의의 각도로 입사하는 파의 반사를 예측하는 해석모형을 제시하였고, 이 모형을 이용하여 Suh (1996)는 하부수직 불투과벽을 매우 급격한 경사의 벽으로 가정함으로써 부분 유공 케이슨에 대해서도 적용할 수 있다고 보고했다. 최근에는, 한 개 또는 두 개의 유수실을 가지는 흡수식 케이슨 방파제와 선형파의 상호작용에 관한 연구가 Williams et al. (2000)에 의해 이루어진 바 있다.

불규칙파의 실험을 다룬 몇몇 연구들[e.g., Bennett et al. (1992)]이 행해진 바가 있기는 하지만, 전술한 연구들은 규칙파를 대상으로 한다. 최근에는 Suh et al. (2001)에 의해 불규칙파의 유공 케이슨 방파제로부터의 반사율을 계산하는 해석모형이 개발되었다. 하지만 여전히 규칙파 모델은 계산상의 단순성으로 인해 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 방법으로 규칙파 모델을 이용하여 불규칙파의 반사율을 산정하였다.

#### 2. 이론적 해석

##### 2.1 규칙파 모델

본 연구에서 사용된 Fuggazza and Natale (1992)의 해석 모형에 대해 살펴보기 위해 먼저 Fig.1 과 같이 종슬리트를 가진 유공 케이슨 방파제를 고려해보자. 여기서  $h$  는 정수면하에서의 수심이고,  $B$  는 유수실 폭,  $2A$  는 유공벽의 인접한 두

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, kdsuh@snu.ac.kr

\*\* ㈜현대건설 기술연구소, syson@hdec.co.kr

부재간의 거리,  $2a$  는 유공벽의 슬릿의 간격,  $r = a/A$  는 유공벽의 개구율이다. 또한  $d$  는 유공벽의 두께이다.  $x$  축과  $y$  축은 각각 유공벽에 정선에 직각이고 평행하다. 수직좌표  $z$  는 정수면으로부터 위쪽방향으로 양의 값이 되도록 정의되었다.

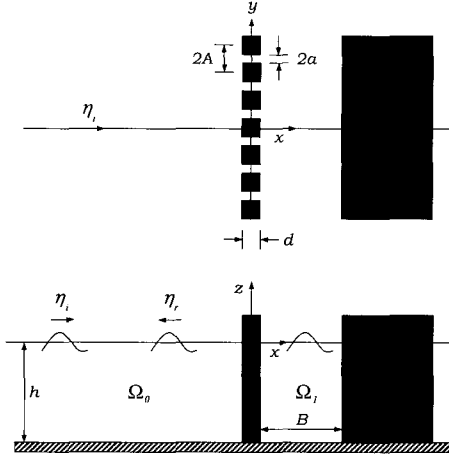


Fig.1 Schematic diagram and coordinate system

먼저 방파제에 수직으로 입사하는 파봉이 긴(long-crested) 단일 성분의 미소 진폭파를 가정한다. 여기서, 입사파의 파수는  $k = 2\pi/L$  와 같고, 파고와 파장은 각각  $H$ 와  $L$  이라고 하자. 이 때 파수와 주기는 선형 분산 관계식인  $\omega^2 = gk \tanh kh$  을 따르게 된다.  $\omega$  는 각주파수이고  $g$  는 중력가속도에 해당한다. 소멸파를 무시하면 속도 포텐셜은 영역  $\Omega_j (j = 0, 1)$  에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_j = \text{Re}\{(a_j + ib_j) \cosh k_j(z+h) e^{i(kx - \omega t)} + (c_j + id_j) \cosh k_j(z+h) e^{i(kx + \omega t)}\}$$

여기서  $i = \sqrt{-1}$ ,  $a_0 = gH / (2\omega \cosh kh)$ , 그리고  $b_0 = 0$  이다. 포텐셜  $\Phi_j$  는 유수실 후면벽에서, 즉  $x = B$  일 때 불투과조건을 만족시켜야 하고 유공벽에서는( $x = 0$ ), 다음과 같은 정합조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} &= 0 \quad \text{at } x = B \\ \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} &= 0 \quad \text{at } x = 0 \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} - \beta \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} - \ell \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial t} &= 0 \quad \text{at } x = 0 \end{aligned}$$

여기서  $\ell$  은 유공벽을 통과하는 제트의 길이이고  $\beta$  는 선형화시킨 에너지 소산계수(linearized dissipation coefficient)이다. 이제  $W = \tan(kB)$ ,  $R = \beta k / \omega$ ,  $P = \ell k$ ,  $G = 1 - PW$  라고 치환하고 대수적인 처리를 거치면 반사계수는 다음과 같이 구해진다.

$$C_r = \frac{\sqrt{c_0^2 + d_0^2}}{a_0} = \frac{[(G^2 + W^2)^2 + W^2 R^2 (W^2 R^2 + 2G^2 - 2W^2)]^{1/2}}{G^2 + W^2 (1 + R)^2}$$

## 2.2 규칙파 모델을 이용하여 불규칙파 반사를 계산하는 방법

규칙파 모델을 이용하여 불규칙파의 반사를 계산하는 방법으로 몇 가지를 생각할 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 이용하였다. 하나는 불규칙파를 규칙파로 가정하는 방법으로 불규칙파의 제곱 평균의 제곱근한 파고  $H_{rms}$  (혹은 유의파고  $H_s$ )와 유의주기( $T_s$ )를 각각 규칙파의 파고와 주기로 가정하는 방법이다. 이 방법을 Method 1 이라고 하자. 하지만 이 방법은 근본적으로 불규칙파의 모든 주파수 성분에 대해서 반사계수가 같다고 가정하기 때문에 반사의 주파수 의존적인 특성이 고려되지 못한다. 계산상 파고를 불규칙파의 유의파고를 사용하든지 제곱 평균의 제곱근한 파고를 사용하든지 큰 차이는 없었다. 따라서 본 연구에서는 후자를 사용한 것이다.

다른 한가지 방법은 불규칙파의 각각의 주파수 성분에 대하여 규칙파 모델을 반복적으로 사용하는 것이다. 이 방법을 Method 2 라고 하자. 주기는 각 주파수 성분에 따라 구할 수 있지만, 각 주파수 성분에 대한 파고는 어느 것을 사용해야 할지 의문의 여지가 있다. 본 연구에서는, 모든 주파수대에 대하여 제곱 평균의 제곱근한 파고를 사용하는 방법과 각 주파수 성분의 스펙트럼 에너지에 의해 구한 파고를 사용하는 방법을 사용하였다.

Method 2 에 의해 반사계수를 계산하면 주파수 성분별로 다르다. 따라서 우선 각 주파수 성분의 반사파 스펙트럼 밀도를 다음 식에 의해 구한다.

$$S_r(f) = |C_r(f)|^2 S_i(f)$$

여기서  $f$  는 주파수이고  $S_i(f)$  는 입사파 에너지 스펙트럼이다. 이 때 주파수 평균한 반사계수,  $\bar{C}_r$ , 는 다음 식에 의해 구할 수 있다(Goda, 2000).

$$\bar{C}_r = \sqrt{\frac{m_{0,r}}{m_{0,i}}}$$

여기서  $m_{0,i}$  와  $m_{0,r}$  는 각각 입사파와 반사파 스펙트럼의 0 차 모멘트로써 전체 주파수 영역에 대해 각 스펙트럼을 적분하여 구한다.

## 3. 수리실험과 규칙파 모형의 검증

### 3.1 수리실험

규칙파 모델을 재검증하기 위해 한국건설기술연구원 방파제 실험동의 2 차원 조파수조를 이용하여 수리모형 실험을 실시하였다.

우선, 방파제 모형은 두께 1 cm 의 투명한 아크릴판을 이용하여 폭 100cm, 높이 70 cm 로 제작하였다. 전면의 유공벽은  $a = 1$  cm,  $A = 3$  cm, 그리고  $d = 1$  cm 의 수직 슬릿으로 제작하여 유공율을 0.333 으로 고정시켰다. 이 모형을 조파기로부터 25 m 의 거리에 위치시키고 입사파와 반사파를 측정하기 위해 3 개의 파고계를 20 cm 와 30cm 의 간격으로 설치하였다. 모든 실험은 수심 40 cm 의 조파수조에서 실행되었다. 유수실의 폭을 15, 30, 45, 그리고 60 cm 의 4 가지로 변화시켰고, 각각의 경우에 대해 3 종류의

파고와 각각의 파고에 대해 4 에서 6 개의 다른 주기를 가진 규칙파를 이용하여 실험하였다.

### 3.4 규칙파 모델의 검증

여기서는, 실험 결과와 계산 결과를 비교함으로써 규칙파 모델을 재검증하였다.

우선, 반사 계수의 실험치와 계산치가 Fig. 2 에 비교되어 있다. 보다 정확한 비교를 위해 Willmott (1981)이 제안한 변수, Index of agreement 를 사용하였다. Index of agreement 는 완전히 일치할 경우 1.0, 완전히 불일치할 경우 0 의 값을 가진다. 여기서는 0.994 로 계산되었다.

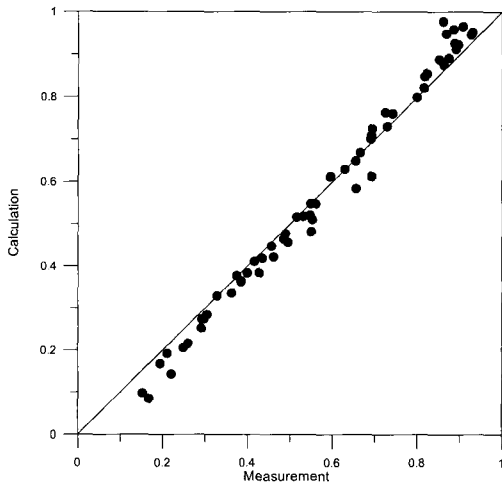


Fig.2 Comparison of reflection coefficients of regular waves between measurement and calculation

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 계산치와 실험치가 전반적으로 잘 일치하였지만, 반사계수가 클 때 다소 과대산정하고, 반사계수가 작을 때 다소 과소산정하는 경향이 있었다. 이는 방파제 근처에서의 소멸파의 영향을 무시한 데 따른 결과로 생각된다.

## 4. 규칙파 모델을 이용한 불규칙파의 반사를 산정

### 4.1 Suh et al. (2001)의 실험치와 비교

본 연구에서 불규칙파의 실험자료로 우선 Suh et al. (2001)의 실험결과를 사용하였다. Suh et al.(2001)은 본 연구에서 사용한 실험장비 및 유공 케이스 방파제 모델을 사용하여 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼 불규칙파로 실험을 하였다.

Method 1 에 의해 구해진 주파수 평균한 반사율 계산치와 측정치를 비교하면 Fig. 3 과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 반사율이 클 때는 상당히 과대산정하고 반사율이 작을 때는 상당히 과소산정하였다. 이 경우의 index of agreement 는 0.903 로 계산되었다.

한편, 모든 주파수에 대하여 파고를 제곱 평균의 제곱근한 파고 ( $H_{rms}$ )라고 가정하고 Method 2 에 의한 주파수 평균한 반사율을 계산하여 실험치와 비교하면 Fig. 4 와 같다. 반사율이 클 경우 다소 과대 산정하였지만 전반적으로 잘 일치하는 결과를 보였고 index of agreement 는 0.978 로 계산되었다.

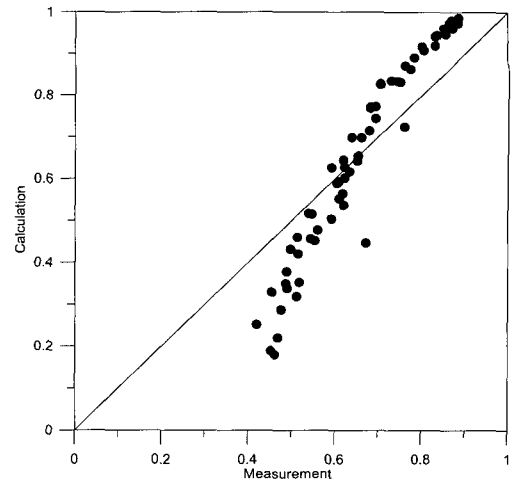


Fig. 3 Comparison of reflection coefficients between measurement and calculation (Method 1)

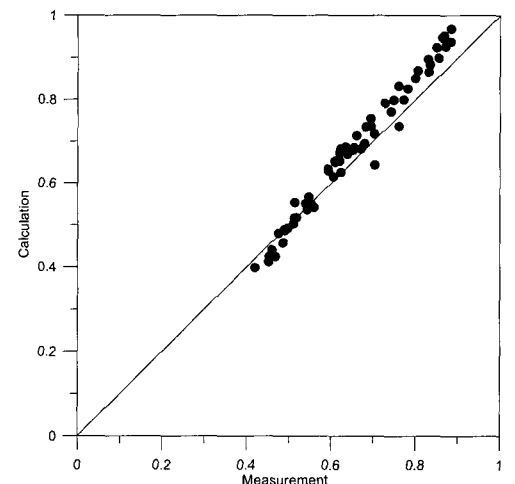


Fig. 4 Same as Fig. 3, but for Method 2 using the root-mean-squared wave height for all the frequencies.

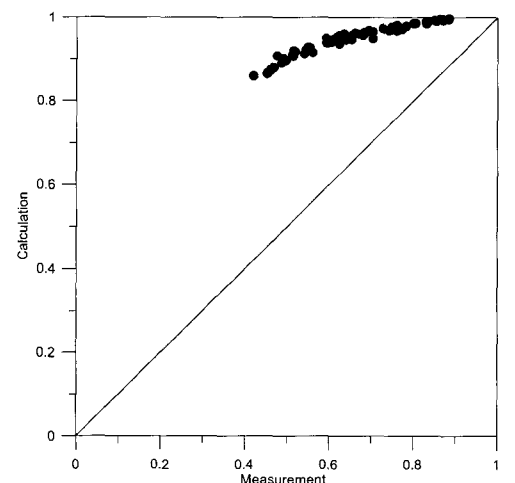


Fig. 5 Same as Fig. 3, but for Method 2 using the wave height corresponding to each frequency component.

또 다른 방법은 파고를 각 주파수 성분의 스펙트럼 에너지로부터 구한 후 Method 2 를 사용하여 반사계수를 계산한 것이다. 이 방법을 이용한 결과가 Fig. 5 에 나타나 있다. 그림에서도 알 수 있듯이, 이 방법은 반사계수를 상당히 과대산정한다. 이는 스펙트럼 에너지에 의해 계산된 파고가

$H_{rms}$  보다 상당히 작아서 파고에 비례하는 에너지 소산이 작게 계산되었기 때문이다. 따라서 방파제로 입사하는 대부분의 파가 반사되어 반사계수가 크게 산정되었다. 이 경우의 index of agreement 는 0.437 으로 매우 작았다.

#### 4.2 Bennett et al. (1992)의 실험치와 비교

Suh et al. (2001)은 비교적 작은 규모의 실험이라고 할 수 있다. 1:15 의 비교적 큰 비율로, Bennett et al. (1992)은 유사한 실험을 수행하였다. 그들은 후면벽이 있는 경우와 없는 경우를 실험하였는데 본 연구에서는 후면벽이 있는 경우의 실험자료를 이용하였다.

계산치를 구하기 위해 앞에서 사용했던 Method 2 를 모든 주파수대에 대해 파고가  $H_{rms}$  로 일정하다고 가정하고 사용하였다. 왜냐하면, 앞서 Suh et al. (2001)의 실험 결과와 비교한 바와 같이, 이 방법이 가장 정확하게 반사계수를 예측했기 때문이다. Fig. 6 은 유공율이 0.148 이고 유수실 폭이 10m 일 경우의 계산치와 실험치간의 비교를 보여준다. 부분적으로 다소 과대산정하였지만 대부분 잘 일치했다.

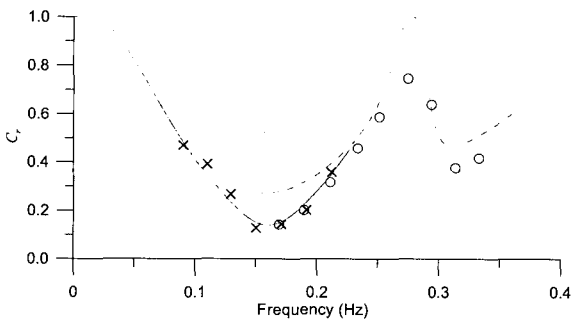


Fig. 6 Measured and calculated reflection coefficients (—, -- = Calculation; x, o = Measurement)

### 5. 결론

유공 방파제에서의 규칙파의 반사에 관한 해석모형은 이미 제안된 바 있다. 또한, 최근에는 불규칙파의 반사에 관한 모형도 개발되었다(Suh et al, 2001). 이러한 불규칙파 모델이 개발되었음에도 불구하고 여전히 계산상 단순성으로 인해 규칙파 모델은 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 Fugazza and Natale (1992)의 규칙파 모델을 이용하여 다양한 방법들을 사용하여 불규칙파의 유공 케이스 방파제로부터의 반사율을 산정하였다.

우선, 규칙파 모델이 수리 모형 실험에 의해 재검증되었다. 실험 측정치와 계산치를 비교해본 결과, 해석모형이 반사율이 큰 경우에 다소 과대산정하고 작은 경우에 다소 과소산정 하였지만, 전반적으로 잘 일치하였다. 이와 같은 현상은 해석 모형에서 소멸파의 영향을 무시했기 때문인 것으로 판단된다.

이렇게 재검증된 규칙파 모형을 이용하여 불규칙파의 유공 케이스 방파제로부터의 반사율이 계산되었다. 본 연구에서, 불규칙파 실험자료로서 Suh et al. (2001)과 Bennett et al. (1992)의 실험자료가 사용되었다. 규칙파 모델을 불규칙파에 적용함에 있어서, 다양한 방법들을 적용하였다. 한가지는 불규칙파를 규칙파로 가정하는 방법인데, 이때 불규칙파의 제공 평균의 제공근한 파고( $H_{rms}$ )와 유의주기( $T_s$ )를 각각 규칙파의 파고와

주기로 가정하는 것이다(Method 1). 다른 방법은 불규칙파의 각각의 주파수 성분에 대하여 규칙파 모델을 반복적으로 사용하는 것이다(Method 2). Method 1 을 사용하여 계산한 결과를 측정치와 비교해 본 결과, 반사율이 큰 경우 상당히 과대산정하고 반사율이 작은 경우 상당히 과소산정한다는 것을 알 수 있었다. 한편, 모든 주파수대에 대하여 파고를 제공 평균의 제공근한 파고( $H_{rms}$ )라고 가정하고 Method 2 를 사용하여 계산한 결과, 계산치와 실험치가 상당히 일치함을 확인하였다. 그러나, 각 주파수대의 파고를 에너지에 근거하여 계산한 파고로 가정하고 Method 2 를 사용한 결과, 반사율은 매우 과대산정되었다.

위 결과를 종합해보면, 규칙파 모델을 불규칙파에 적용할 경우, 모든 주파수대의 파고를 제공평균의 제공근한 파고( $H_{rms}$ )라고 가정하고 규칙파 모델을 각 주파수 성분에 대해 반복적으로 사용하는 방법이 가장 정확하게 반사율을 예측하였다.

### 참고문헌

- [1] Bennett, G.S., McIver, P., Smallman, J.V., 1992. A mathematical model of slotted wavebreakwater. *Coastal Eng.*, 18: 231-249.
- [2] Fugazza, M., Natale, L., 1992. Hydraulic design of perforated breakwaters. *J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng.*, 118: 1-14.
- [3] Goda, Y., 2000. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. 2nd ed., World Scientific, Singapore, 443 pp.
- [4] Kakuno, S., Oda, K., Liu, P.L.-F., 1992. Scattering of water waves by vertical cylinders with a backwall. In: *Proc. 23rd Coastal Eng. Conf., Venice*, Vol. 2, pp. 1258-1271.
- [5] Kondo, H., 1979. Analysis of breakwaters having two porous walls. In: *Proc. Coastal Structures '79*, Vol. 2, pp. 962-977.
- [7] Suh, K.D., 1996. Wave reflection from partially perforated caisson breakwater. *J. Korean Soc. Coastal Ocean Engrs.* 8(3): 221-230.
- [8] Suh, K.D., Choi, J.C., Kim, B.H., Park, W.S., Lee, K.S., 2001. Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Eng.*, 44: 141-151
- [9] Suh, K.D., Park, W.S., 1995. Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Eng.*, 26: 177-193.
- [10] Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M., Osato, M., 1976. An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls. *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, Ministry of Transport, Japan, No. 246, 38 pp. (in Japanese, with English abstract).
- [11] Williams, N., Mansour, A.M., Lee, H.S., 2000. Simplified analytical solutions for wave interaction with absorbing-type caisson breakwaters. *Coastal Eng.*, 27: 1231-1248.
- [12] Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Phys. Geog.* 2: 184-194.