

論 文

사석방파제에 의한 파랑변형에 관한 연구

강인식* · 광기석** · 김도삼*** · 양윤모****

Wave Transformation of a Rubble-Mound Breakwater

I. S. Kang · K. S. Kwak · D. S. Kim · Y. M. Yang

Key Words : 잠수상태의 임의 형상 사석방파제(submerged rubble-mound breakwater of arbitrary cross section), 1층 및 2층 사석방파제(one and two-layered rubble-mound breakwater), 마찰계수(friction coefficient), 감쇠정상파(evanescent mode wave), 경계 적분방정식법(boundary integral method), 반사율(wave reflection ratio), 투과율(wave transmission ratio).

Abstract

A theoretical formulation is performed to investigate the wave reflection and transmission ratios by a submerged multilayered rubble-mound breakwater. This theory, which is based on the linear boundary integral method, can be extended to the multilayered breakwater with arbitrary cross-section. In the theoretical analysis evanescent mode wave is not considered, since fictitious open boundaries are put on the places far from the structure. Therefore the mathematical presentation may be simpler, and computational time shorter. The validity of obtained numerical results is demonstrated by comparing with ones of impermeable and permeable breakwaters. Comparison shows reasonable agreement. On the basis of these verifications this theory is applied to the one and two-layered submerged rubble-mound breakwater with trapezoidal type.

1. 서 론

파랑제어 목적으로 여러 형태의 사석방파제가 건설되어 왔다. 특히 잠제형식을 갖는 사석방파제는 해수교환의 우수성, 연약지반상에 지반의 개량없이 사용할 수 있다는 점 및 주변 경관에

영향을 주지 않는다는 측면에서 그 건설이 향후 보다 증대될 것으로 생각된다.

사석방파제에 의한 파랑제어기능의 연구는 주로 矩形 혹은 蹄形단면을 갖는 반잠수 형태(近藤, 1969; 富永 · 坂本, 1969; 井島 · 江口 · 小林, 1971; Sollitt and Cross, 1972; Madson, 1974; Su-

* 부산대학교 토목공학과 강사

** 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 한국해양대학교 항만운송공학과 전임강사

**** (주)해강건설 부설 기술개발연구소 소장

Sollitt and Cross(1972)는 [저항력]으로서 laminar drag, turbulent drag 및 부가질량성분을 고려하여 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(p + \gamma z) - \frac{v\varepsilon}{K} \vec{q} - \frac{C_f \varepsilon^2}{K^{1/2}} |\vec{q}| \vec{q} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} C_M \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} \dots (2)$$

여기서, v 는 유체의 동점성계수, ε 는 공극율, K 는 투과율, C_f 는 무차원의 turbulent 저항계수, C_M 은 부가질량계수를 나타낸다.

식(2)에서 우변의 두번째 및 세번째 항을 다음과 같이 선형화할 수 있다(Sollitt and Cross, 1972).

$$\frac{v\varepsilon}{K} \vec{q} + \frac{C_f \varepsilon^2}{K^{1/2}} |\vec{q}| \vec{q} \rightarrow f\sigma \vec{q} \dots (3)$$

여기서 f 는 무차원의 마찰계수, σ 는 각주파수를 나타낸다.

식(3)의 결과를 식(2)에 대입하고, 식(2)의 우변의 네번째항을 좌변으로 이항하여 다음의 식을 얻는다.

$$S \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(p + \gamma z) - f\sigma \vec{q} \dots (4)$$

여기서, S 는 관성계수로 $S=1+(1-\varepsilon)C_M/\varepsilon$ 이다.

비압축성유체의 연속방정식은 다음식으로 주어진다.

$$\nabla \cdot \vec{q} = 0 \dots (5)$$

2.2 경계조건

Fig. 1에 나타내고 있는 임의의 형상의 다층구조를 갖는 사석방과제에 대해서 각 층의 재료는 동일로 구성되어 있다고 가정한다. 분할된 영역에서의 유체는 비압축 비점성으로 가정하며, 각 층의 ε_ℓ , K_ℓ 및 $C_{f\ell}$ ($\ell=3, 4, \dots, L+2$)의 값은 기지로 가정한다. 영역 R_1 와 R_{L+3} 에서 수심은 일정한 h_1 과 h_2 를 갖는다. 따라서 이 영역에서는 해석적으로 속도포텐셜을 구할 수 있다.

• 지배방정식

각 분할영역에서의 유체운동은 속도포텐셜로 표현할 수 있으며, 속도포텐셜 $\Phi_\ell(x, z, t)$ 를 다음과 같이 공간과 시간 함수로 분리한다.

$$\Phi_\ell(x, z, t) = Re[\phi_\ell(x, z)e^{i\sigma t}] \quad \ell=1, 2, 3, \dots, L+3 \dots (6)$$

여기서, $i = \sqrt{-1}$

$\phi_\ell(x, z)$ 는 다음의 Laplace방정식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi_\ell = 0 \dots (7)$$

여기서, $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2, \partial^2/\partial z^2)$

• 경계조건

(1) $S_{\ell, 0}$ 상의 수면경계조건 :

$$\frac{\partial \phi_\ell}{\partial z} - \frac{\sigma^2}{g} \phi_\ell = 0, z=0 \dots (8)$$

(2) $S_{\ell, \ell}$ 상의 불투과경계조건 :

$$\frac{\partial \phi_\ell}{\partial n_{\ell, \ell}} = 0 \dots (9)$$

(3) $S_{\ell, m}$ 과 $S_{m, \ell}$ 상에서의 압력(운동학적 경계조건)의 연속조건 :

$$(S_\ell - if_\ell)\phi_\ell = (S_m - if_m)\phi_m \dots (10)$$

(4) $S_{\ell, m}$ 과 $S_{m, \ell}$ 상에서의 유속(역학적 경계조건)의 연속조건 :

$$\varepsilon_\ell \frac{\partial \phi_\ell}{\partial n_{\ell, m}} = -\varepsilon_m \frac{\partial \phi_m}{\partial n_{m, \ell}} \dots (11)$$

여기서, $\ell(m)=1, 2, L+3$ 의 경우는 $f_{\ell(m)}=0$, $S_{\ell(m)}=1$ 및 $\varepsilon_{\ell(m)}=1$ 이다.

(5) $S_{1, 2}$ 와 $S_{L+3, 2}$ (가상경계면)상에서의 경계조건 :

가상경계면이 구조물로부터 충분히 떨어진 곳에 설치되므로 구조물과 파와의 간섭에 의해 발생하는 감쇠정상파의 영향을 무시할 수 있고, 따라서 영역 R_1 과 R_{L+3} 에서의 파는 진행파의 성분

만이 존재한다. 영역 R_1 에서의 파는 입사파와 구조물에서의 반사로 인한 반사파가 공존하며, 영역 R_{L+3} 에서는 투과파만의 성분이 존재한다.

영역 R_l 과 R_{L+3} 에서의 속도포텐셜은 $S_{\ell, \sigma}(\ell=1, L+3)$ 상의 수면경계조건과 $S_{\ell, \epsilon}(\ell=1, L+3)$ 상의 불투과 경계조건 및 Sommerfeld의 방사경계조건을 만족하는 Laplace방정식의 해로 주어지며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\phi_1(x, z) = \frac{iag}{\sigma} (e^{ik_1 x} + B e^{-ik_1 x}) \frac{\cosh k_1(z+h_1)}{\cosh k_1 h_1} \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_{L+3}(x, z) = \frac{iag}{\sigma} I e^{ik_2 x} \frac{\cosh k_2(z+h_2)}{\cosh k_2 h_2} \dots\dots\dots (13)$$

여기서 a 는 입사파의 진폭, B 와 I 는 반사율과 투과율, k_1 과 k_2 는 다음 식으로 주어지는 고유치이다.

$$\frac{\sigma^2}{g} = \tanh k_1 h_1 = \tanh k_2 h_2$$

따라서 $S_{1, 2}$ 와 $S_{L+3, 2}$ 에서의 경계조건은 식(12)와 (13)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$S_{1, 2}$ 에 대해서 ;

$$\phi_1 |_{x=x_1} = \frac{iag}{\sigma} (e^{ik_1 x_1} + B e^{-ik_1 x_1}) \frac{\cosh k_1(z+h_1)}{\cosh k_1 h_1} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n_{1, 2}} |_{x=x_1} = -\frac{agk_1}{\sigma} (e^{ik_1 x_1} - B e^{-ik_1 x_1}) \frac{\cosh k_1(z+h_1)}{\cosh k_1 h_1} \dots\dots\dots (15)$$

$S_{L+3, 2}$ 상에 대해서 ;

$$\phi_{L+3} |_{x=x_1} = \frac{iag}{\sigma} I e^{-ik_2 x_1} \frac{\cosh k_2(z+h_2)}{\cosh k_2 h_2} \dots\dots\dots (16)$$

$$\frac{\partial \phi_{L+3}}{\partial n_{L+3, 2}} |_{x=-x_2} = \frac{agk_2}{\sigma} I e^{-ik_2 x_2} \frac{\cosh k_2(z+h_2)}{\cosh k_2 h_2} \dots\dots\dots (17)$$

2.3 경계적분방정식의 적용

Fig. 1에 나타내고 있는 각 영역($\ell=2, 3, \dots, L+2$)에 대해 경계상의 속도포텐셜에 다음의 Green공식을 적용할 수 있다.

$$\phi(X)_\ell = \int_s \left\{ \phi_\ell(X_b) \frac{\partial G_\ell(r)}{\partial n_{\ell, m}} - G_\ell(r) \frac{\partial \phi_\ell}{\partial n_{\ell, m}} \right\} ds, \ell=2, 3, \dots, L+2 \dots\dots\dots (18)$$

여기서, $G_\ell(r) = \log r/\pi$, X 와 X_b 는 각 영역경계면에서의 임의의 점, $\phi(X)$ 와 $\phi(X_b)$ 는 점 X 와 X_b 에서의 속도포텐셜, r 은 점 X 와 X_b 사이의 거리, s 는 기준점에 대해 경계에 연관 선분을 나타낸다.

위의 식(18)을 사용해서 경계상의 속도포텐셜을 구하는 과정은 다음과 같다.

(a) 각 영역에 있어서 경계조건을 변화시켜 고려하여 경계를 분할하고, 분할된 경계에 절점을 취하여 다시 소요소로 분할한다.

(b) 각 영역의 소요소에 대해서 경계면에 주어진 경계조건을 고려하여 식(18)으로부터 중앙절점에 대한 연립방정식을 얻는다. 이는 행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

영역 2에 대해서 ;

$$[U_2] \begin{bmatrix} \phi_2 |_p \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial n_{2, \ell}} \\ I \\ B \end{bmatrix} |_q = [W_2] \dots\dots\dots (19)$$

이외의 영역에 대해서 ;

$$[U_\ell] \begin{bmatrix} \phi_\ell |_{\bar{p}} \\ \frac{\partial \phi_\ell}{\partial n_{\ell, \bar{\ell}}} \end{bmatrix} |_{\bar{q}} = [W_\ell] \dots\dots\dots (20)$$

여기서, ℓ 은 영역 2가 구조물의 표면과 접하는 영역의 경계면, $\bar{\ell}$ 은 사석영역이 유체영역과 접하는 경계 및 사석과 사석의 영역이 접하는 경계, p, q, \bar{p}, \bar{q} 는 대응하는 경계상에서 중앙절점, c 는 사석으로 구성되는 각 영역, $[U_2], [W_2], [U_\ell], [W_\ell]$ 는 대응하는 계수행렬을 나타낸다.

(c) (b)에서 얻어진 각 영역에 대한 연립방정식은 미지수의 수가 연립방정식의 수보다 많아지게 된다. 이에 대해 식(8)과 (9)로 주어지는 연속조건을 사용한다. 이 연립방정식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$[S_e - if_\epsilon][\phi_e |_p] - [S_m - if_m][\phi_m |_q] = 0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$[\epsilon_\epsilon] \left[\frac{\partial \phi_e}{\partial n_{e,m}} \Big|_p \right] + [\epsilon_m] \left[\frac{\partial \phi_m}{\partial n_{m,\epsilon}} \Big|_q \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

(d) (c)의 고정으로부터 미지수의 수와 동일한 연립방정식의 수를 얻을 수 있으며 식(19), (20), (21) 및 (22)를 연립하여 풀면 영역경계상에서의 속도포텐셜, 입사파의 반사율과 투과율을 구할 수 있다.

3. 수치해석 결과

3.1 기존 해석결과와의 비교·검토

본 해석의 적용의 하나로 Fig. 2에 나타내고 있는 2열의 구형불투과장애에 의한 입사파의 반사율과 투과율을 살펴본다. 이에 본 이론을 적용하는 경우는 구조물이 불투과이므로 구조물표면에서 불투과경계조건을 사용하며, 영역은 Fig. 1에서 $R=1, 2, L+3$ 으로 주어진다. 따라서, $S=1, f=$

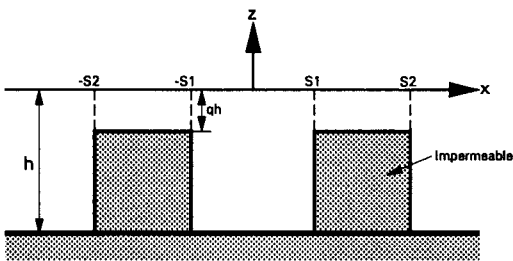
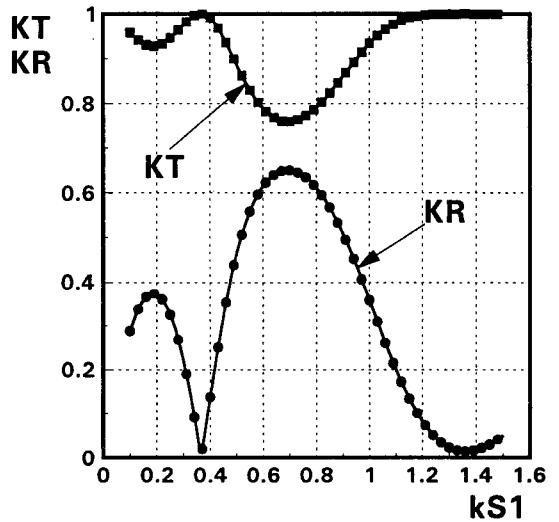


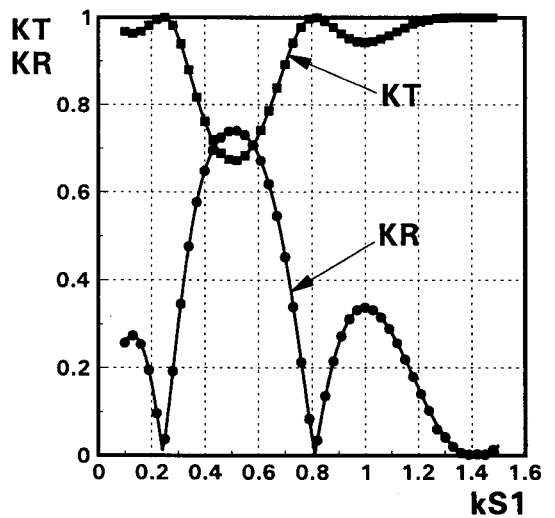
Fig. 2 Definition sketch of submerged rectangular typed breakwater with two-rays.

$0, \epsilon=0$ 로 되며, 마찰의 영향이 고려되지 않으므로 에너지의 보존이 성립한다.

Fig. 3는 Fig. 2의 경우에 입사파의 반사율과 투과율을 나타낸 것으로, $(S2-S1)/(h-gh)=1.0, h/(h-gh)=1.5$ 에 대해 $S1/(h-gh)=1.0, 2.0, 3.0$ 의 변화에 따른 $kS1$ 과 KR (반사율), KT (투과율)와의 관계를 나타내고 있다. 실선은 본 연구의 결과를 나타내며, ●(반사율) 및 ■(투과율)는 喜岡·松



(a) $S1/(h-gh) = 1.0$



(b) $S1/(h-gh) = 2.0$

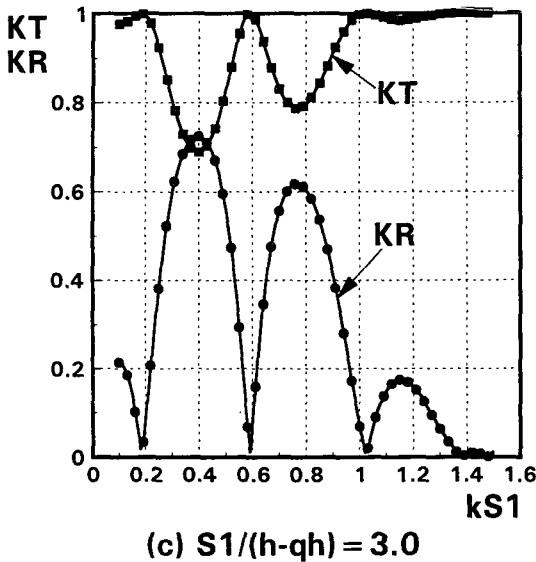


Fig. 3 Wave transformation of submerged rectangular typed breakwater with 2-rays.

(— : this study
 ■● : Kioka et al. (theory))

野·源川(1989)에 의한 이론해석의 결과로서, 이론해석은 wide-spacing 근사에 의한 고유함수 전개법을 사용하고 있다. 그림에서 반사율을 보면 내측 잠제의 간격이 좁아질수록 Peak치를 나타내는 값의 발생이 많아지고, 그로 인해 최소치를 나타내는 값의 발생 역시 많아진다. 이와 같은 현상은 입사파의 파장, 구조물의 간격, 잠제천단의 수심 및 폭과 연관관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 본 해석결과는 喜岡·松野·源川(1989)의 결과와 완전히 일치함을 알 수 있으므로 본 해석의 타당성이 검증된다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타내고 있는 볼투과의 제형 잠제에 의한 입사파의 반사율과 투과율을 나타낸 것으로, $B1/h=0.5$, $(h-qh)/h=0.7$, $B2/h=1.9$ 의 경우의 결과이다. 이에 대한 본 이론해석의 적용은 역시 볼투과성이므로 전술한 2열의 구형볼투과잠제의 경우와 동일하다. 해석결과(실선이 본 해석결과, ●는 井島·吉田·北山(1982)의 결과)

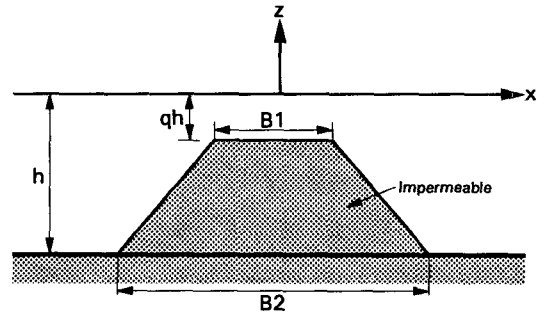


Fig.4 Definition sketch of submerged trapezoidal typed breakwater.

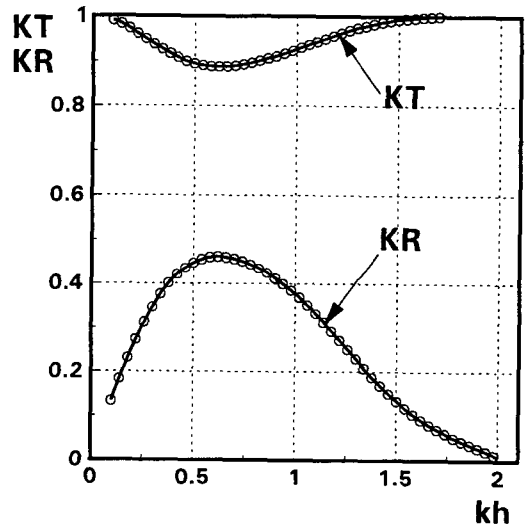


Fig. 5 Wave transformation of submerged trapezoidal typed breakwater.

($B1/h=0.5$, $(h-qh)/h=0.7$, $B2/h=1.9$)
 (— : this study ○: Izima et al.)

를 보면 kh의 변화에 따른 투과율 및 반사율의 값의 변화는 Fig. 3과 같이 현저한 변화의 양상을 나타내지 않고 kh=0.6에서 반사율은 최대치를, 투과율은 최소치를 각각 나타내며, 본 해석의 결과와 井島·吉田·北山(1982)의 결과는 완전히 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에 나타내고 있는 구형의 반잠수 투과성잠제(공극률 $\epsilon=0.4$)에 의한 입사파의 투과

울을 나타내고 있다. 점선($f=0$), 파선($f=1$) 및 실선($f=3$)이 본 해석의 결과를, \circ ($f=1$) 및 \triangle ($f=3$)가 고유함수전개법에 의한 井島·江口·小林(1971)의 결과를 각각 나타내며, 여기서 부가 질량계수를 $C_M=0(S=1)$ 를 사용하고 있다. 그림을 보면 동일한 공극률($\epsilon=0.4$)에 대해서 $S1/h$, 즉 수심에 대한 구조물 폭의 비가 증가할 수록 파의 투과율이 감소하는 경향을 나타내며, 동일한 ϵ , $S1/h$ 에 대해서 마찰계수 f 가 증가할 수록 파의 투과율은 감소함을 알 수 있다. 특히 경계적분방정식법에 의한 본 해석결과와 고유함수전개법에

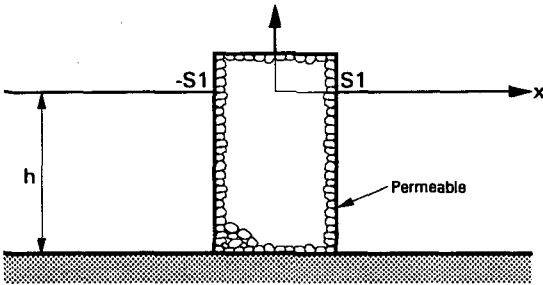
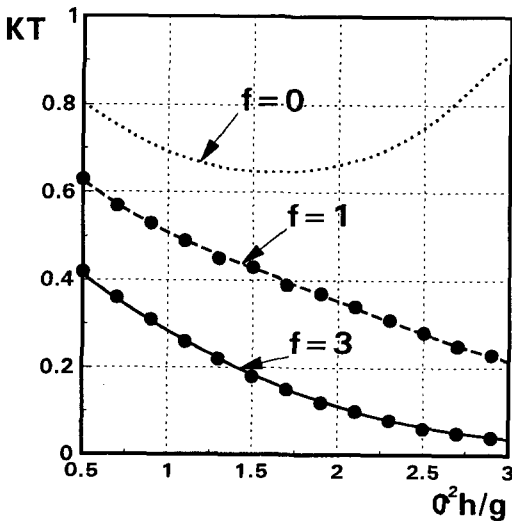
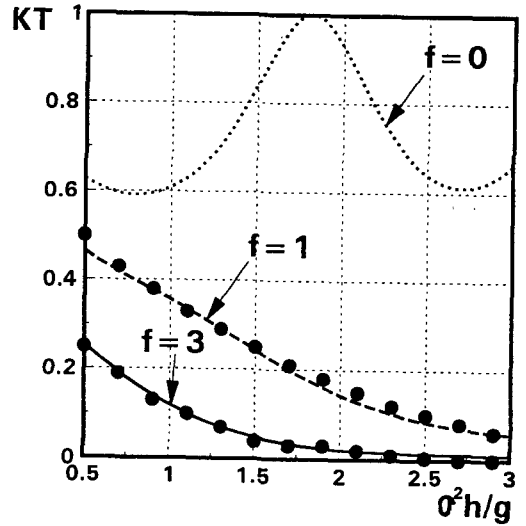


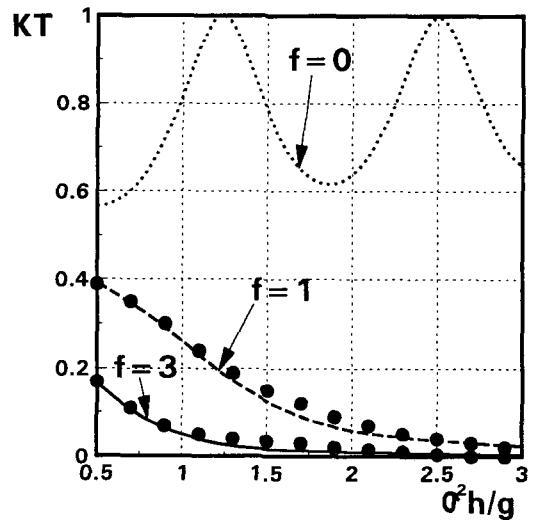
Fig. 6 Definition sketch of rectangular semi-submerged breakwater.



(a) $S1/h = 0.22$



(b) $S1/h = 0.42$



(c) $S1/h = 0.62$

Fig. 7 Wave transmission ratio of rectangular semi-submerged permeable breakwater.

의한 井島·江口·小林(1971)의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

이상과 같은 본 해석의 결과와 타의 해석결과와의 비교·검토와 해석결과들의 일치성으로부터 본 해석결과와 타당성이 입증된다.

3.2 1층 및 2층구조의 잠수사석방파제에 의한 파랑변형

Fig. 9는 Fig. 8에 나타내는 1층의 잠수제형사석 방파제에 의한 입사파의 반사율과 투과율을 나타낸 일례로, $h=60cm$, $B1=30cm$, $B2=60cm$, $S=1.0$, $\epsilon=0.8$ 에 대해서 잠수심 qh 와 마찰계수 f 를 파라미터로 주기의 변화에 따른 파랑변형의 변화를 주고 있다. 그림에서 파선이 $qh=6cm$, $f=1.0$, 실선이 $qh=6cm$, $f=3.0$ 및 점선이 $qh=12cm$, $f=1.0$ 인 이론해석의 결과들이다. 그림을 보면 주기의 변화에 따른 투과율의 변화는 Fig. 3, 5와 같은 큰 변화를 나타내지 않고 Fig. 7과 유사한 변화과정을 즉, 장주기파로 갈 수록 투과율이 약간 상승하는 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 투과율의 변화는 동일한 마찰계수 f 에 대해서 잠수심이 커지면 투과율이 커지고, 동일한 잠수심 qh 에 대해서 마찰계수가 커지면 투과율이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10에서 나타낸 2층구조의 잠수제형사석방파제 ($\epsilon_1=\epsilon_2=0.8$, $S_1=S_2=1$)에 의한 반사율과 투과율의 결과로, 점선이 $h=60cm$, $q1h=12cm$, $q2h=20cm$, $B1=30cm$, $B2=15cm$, $B3=60cm$, $B4=40cm$, $S_1=S_2=1.0$, $\epsilon_1=\epsilon_2=0.8$, $f_1=f_2=1.0$ 인 경우를, 파선이 점선의 경우와 동일하나 $q1h=6cm$, $q2h=16cm$, $B4=39.4cm$ 인 경우를, 실선이 파선의 경우와 동일하나 $f_1=2.0$, $f_2=3.0$ 인 경우를 각각 나타낸 이론해석의 결과이다. 이의 결과는

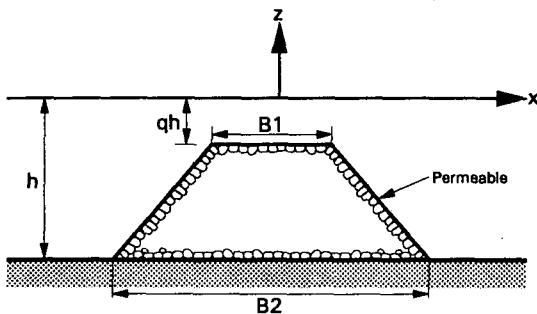


Fig. 8 Definition sketch of submerged trapezoidal typed breakwater with one-layer.

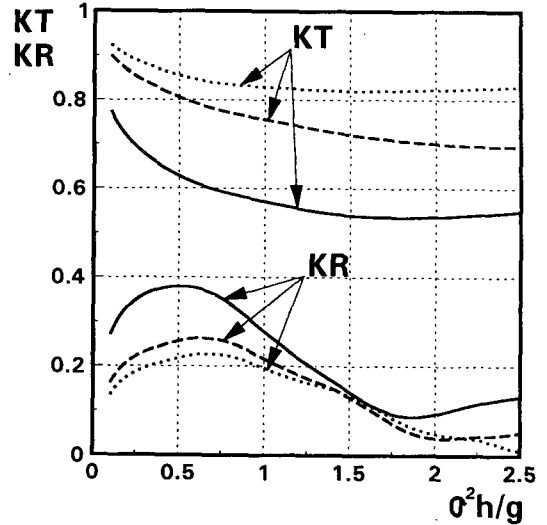


Fig. 9 Wave transformation of trapezoidal submerged permeable breakwater with one layer.

($B1/h=0.5$, $(h-qh)/h=0.7$, $B2/h=1.9$)
 (..... : $qh=12cm$, $f=1.0$)
 (---- : $qh=6cm$, $f=1.0$)
 (— : $qh=6cm$, $f=3.0$)

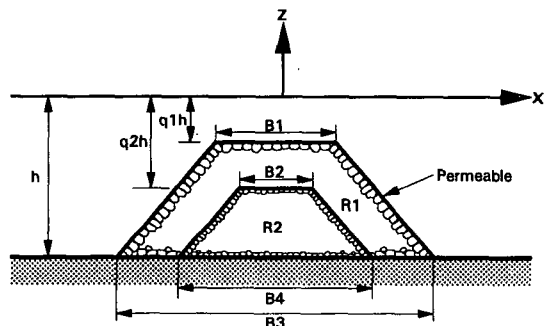


Fig. 10 Definition sketch of submerged trapezoidal typed breakwater with two-layers.

Fig. 9의 결과로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 잠수심이 커지고 마찰계수의 값이 적어지면 투과율이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

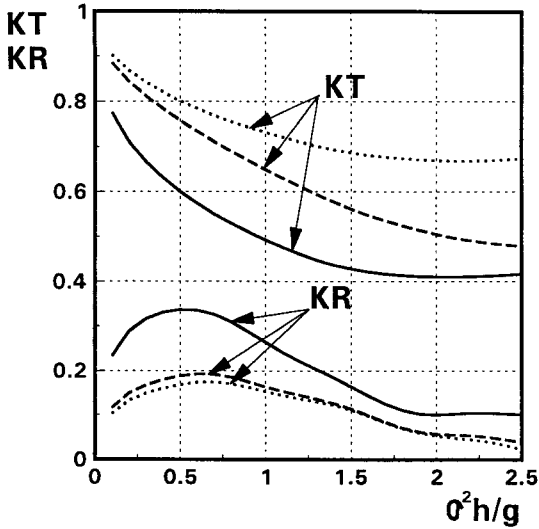


Fig. 11 Wave transformation of trapezoidal submerged permeable breakwater with two layer.

- : $h = 60\text{cm}, q_1h = 12\text{cm}, q_2h = 20\text{cm}$
 $B_1 = 30\text{cm}, B_2 = 15\text{cm}, B_3 = 60\text{cm}$
 $B_4 = 40\text{cm}, f_1 = f_2 = 1.0$
- : $h = 60\text{cm}, q_1h = 6\text{cm}, q_2h = 16\text{cm}$
 $B_1 = 30\text{cm}, B_2 = 15\text{cm}, B_3 = 60\text{cm}$
 $B_4 = 39.4\text{cm}, f_1 = f_2 = 1.0$
- : $h = 60\text{cm}, q_1h = 6\text{cm}, q_2h = 16\text{cm}$
 $B_1 = 30\text{cm}, B_2 = 15\text{cm}, B_3 = 60\text{cm}$
 $B_4 = 39.4\text{cm}, f_1 = 2.0, f_2 = 3.0$

4. 맺음말

본 연구에서는 반잠수상태의 투과성구조물에 대해 전개되어 있는 이론해석을 수정·보완하여 잠수상태의 투과성구조물에 적용하여 구조물에 의한 파랑변형을 살펴봄과 동시에, 해석결과와의 타당성을 검증하기 위해서 기존의 해석결과와 비교하였다. 이로부터 본 해석결과와의 타당성이 확증되므로 임의의 형상의 다층구조 투과성구조물 및 불투과성구조물에 의한 파랑제어기능을 판단하는데 적용할 수 있고, 그의 유용성이 인정된다.

참고문헌

- 1) Sollitt, Ch. K. and Cross, R. H.(1972) : Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vancouver, pp. 1827-1846.
- 2) Madson, O. S.(1974) : Wave transmission through porous structures, ASCE J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div., 102(WW1), pp. 169-188.
- 3) Sulisz, W.(1985) : Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section, Coastal Eng., No. 9, pp. 371-386.
- 4) 近藤淑郎(1969) : 透過性防波堤の傳達波, 第16回海岸工学講演會講演集, pp. 321-327.
- 5) 富永正照·坂本忠彦(1969) : 透過性構造物による波の變形に關する研究(1)-鉛直捨石堤による波の反射率と透過率について-, 第16回海岸工学講演會講演集, pp. 309-319.
- 6) 井島武士·江口泰彦·小林 彰(1971) : 透過性防波堤の研究, 九大工学集報, 第44卷, 第4報, pp. 505-514.
- 7) 喜岡 涉·松野忠幸·源川秀樹(1989) : 複數列配置した潜堤による波浪制御, 海岸工学論文集, 第36卷, pp. 549-553.