

사석방파제 투수하부층 두께에 따른 사면상의 수리특성 실험연구

윤한삼* · 김종욱** · 류청로***

*(주)한국연안개발기술, **현대중공업(주) 선박해양연구소, ***부경대학교 해양공학부

Experimental Study for Hydraulic Characteristics as the Permeable Underlayer Thickness of Rubble Mound Structure

HAN-SAM YOON*, JONG-WOOK KIM** AND CHEONG-RO RYU***

*Korea Coastal Development Technology Co. Ltd., Seoul, Korea

**Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., Ulsan, Korea

***School of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Rubble Mound Structure 사석방파제, Hydraulic Characteristics 수리특성, Wave Run-up 소상파고, Wave Reflection 반사파, Wave Set-up 평균수면상승고, Wave-Structure Interaction 파랑구조물 상호작용

ABSTRACT: In this study, the effects on hydraulic characteristics are discussed as the permeable underlayer thickness of the rubble mound structure changes. A series of hydraulic experiments were performed and wave run-up, reflection and set-up were investigated. Results indicated that wave run-down was affected by the water out from the permeable underlayer during down-rush. As the thickness increased, relative wave run-up decreased.

1. 서 론

최근 해안구조물 설계시 외해 입사파랑의 불규칙성과 아울러 구조물의 형상 및 구조물 제체의 투수성을 함께 고려하려는 연구가 강조되고 있다(Losada *et al.*, 1981; Kobayashi, 1986; Van Gent *et al.*, 1994; 진재우, 2000; 김동욱, 2001). 특히, 심해 파랑이 천해역으로 침입하는 경우 천수, 굴절 등의 파랑변형을 일으킴과 동시에 사석방파제와 같이 투수성을 가진 구조물인 경우에는 구조물 내부로의 파랑에너지 침투 효과로 인해 사면상의 수리현상은 더욱 복잡한 특성을 나타낸다.

경사제 해안구조물 설계시 설계인자로 사용되어지는 소상파고(wave run-up)와 구조물에 의한 파랑의 반사는 각각 구조물의 천단고 및 구조물 주변의 파동장을 결정함에 있어 중요한 인자이다(Ahrens, 1981; Ryu, 1984). 기존 많은 연구자들에 의해 불규칙한 해양파랑을 대상으로 한 수리모형실험이 광범위하게 수행되어졌다고 할지라도 경사제 구조물 전면으로 침입하는 불규칙 파랑과 소상파고 및 반사파에 대한 수리역학적 상호관련성에 대한 충분한 정량적 평가는 아직 미흡하다고 판단된다(Bruun, 1985; Losada *et al.*, 1997).

이중 구조물의 소파능력을 특징짓는 투수하부층의 두께는 사면상 또는 구조물 주변에서의 파동장에는 크게 영향을 미치지 않는다고 판단 주변의 지형적 여건이나 경제적 조건만을 고려하여 투수층 두께를 결정하는 경우가 많으며, 대체로 해안

구조물 피해저감을 위해 천단고의 과다설계나 중량이 큰 소파블럭의 시공에 치중하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 1:3 경사를 가진 사석방파제를 대상으로 불투과 거친 경사면과 임의 투수층 폭을 가진 경사면에 대해서 불규칙파 수리모형실험을 수행하고, 사석방파제 투수하부층 두께변화에 따른 사면상의 소상파고, 반사, 평균수면상승고(wave set-up) 등 사면상의 수리특성에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 수리모형실험

본 연구는 해안구조물 사면상에서의 소상파고가 구조물의 투수하부층의 유무 및 두께변화에 따라서 어떻게 거동하는가를 살펴보기 위해 급경사(1:3) 사면상에서 불규칙 입사파랑을 대상으로 수리모형실험을 수행하였다.

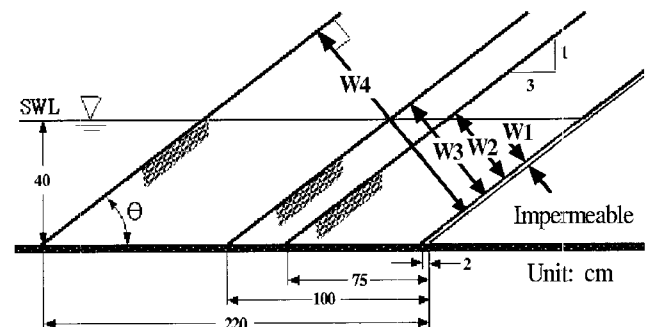


Fig. 1 Definition of permeable underlayer thickness

실험조파수조는 폭 1.0 m, 길이 35.0 m, 높이 1.0 m인 2차원 수조로 한쪽 끝에는 불규칙 조파기를, 수조내 1/40의 완만한 경사면 위에는 1/3 경사의 사석방파제를 설치하였다(Fig. 1). 또한 실험 수행시 toe부의 수심은 40 cm로 모든 실험 경우에 대해 동일하게 적용하였으며, 불투과사면은 합판을 이용하여 제작하였다.

또한 실험 단면의 투수층의 수평폭은 각각 0.02, 0.75, 1.0, 2.2 m의 총 4가지로 설정하였으며, 사석의 중앙입경은 2.0 cm로 모든 단면에 대해 동일하게 적용하였다. Fig. 1에서 W1, W2, W3, W4는 불투과사면으로부터 사면상에 수선을 내린 최단직선거리를 나타내며 각 단면의 투수하부층 두께를 의미하는 것으로, 수평폭의 길이에 사면경사각을 곱한 값이다.

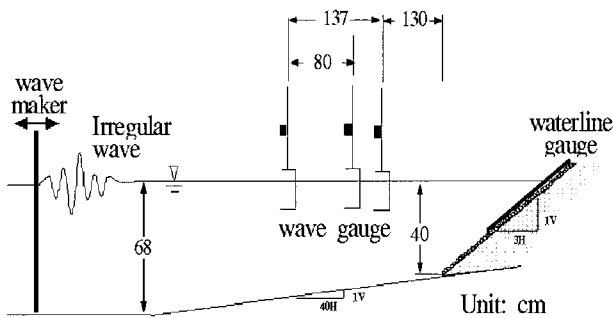


Fig. 2 Layout of experimental set-up

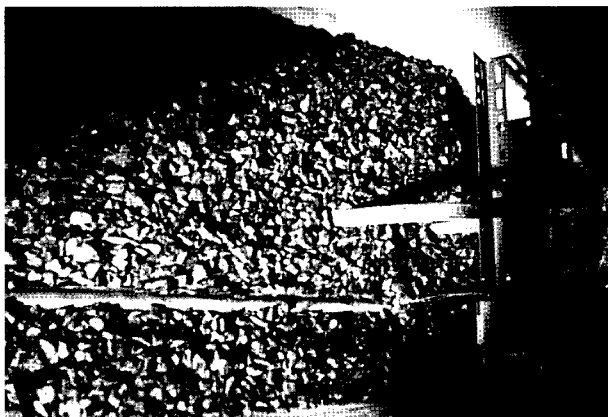


Photo 1 Set-up of run-up gauge for Run2, Run3, Run4 cases

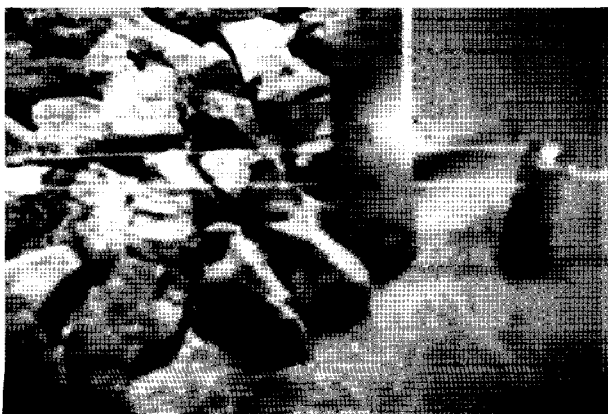


Photo 2 Set-up of run-up gauge for Run1 case

실험 조건은 투수하부층의 두께가 다른 각각의 경우에 대해 Run1, Run2, Run3, Run4로서 구분한다. 실험파랑조건인 불규칙파랑은 JONSWAP 스펙트럼을 목적스펙트럼으로 하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(f) = \alpha S(f)_{PM} \gamma^\beta \quad (1)$$

여기서, $S(f)_{PM}$ 는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼, γ 는 첨예화 계수(3.3을 적용), $\beta = \exp[-(f-f_p)^2 / 2\sigma^2 f_p^2]$ 이며, Phillips 상수 α 는 0.0081이다.

조파수조내 불규칙파의 수면변동을 계측하기 위해 수조 중앙위치에 3개의 용량식 파고계를 구조물 1:3 경사의 전방에서 조파기 방향으로 3지점에 설치하였다(Fig. 2). 또한 Photo 1과 같이 경사면 위에 길이 1 m의 소상파고계(wave run-up gauge)를 불투과사면과 약 1 cm의 간격을 두고 평행하게 설치하여 wave run-up을 측정하였으며, 소상파고계와 구조물 사석간의 오차간격은 약 1~2 mm이다(Photo 2). 수리모형실험(Photo 3)에 사용된 구조물 및 대상파랑인 불규칙파랑의 주요 제원은 Table 1과 같다.

실험파랑의 유효주파수 범위는 $0.11\text{Hz} < f_* < 1.5\text{Hz}$ 이며, 평균수면은 계측된 시계열의 평균값으로 취하고, 파의 수면변동

Table 1 Experimental conditions

Parameters		Conditions
Structure	W_a	2 ~ 5 g (Quarry stone)
	Slope (θ)	1:3 (Permeable & Impermeable)
	h_t (cm)	40.0
	h_c (cm)	Non-overtopping
	i	1:40
Wave	$T_{1/3}$ (sec)	1.0 ~ 2.5
	$H_{1/3}$ (cm)	3.3 ~ 7.3

W_a : Weight of core material, i : Slope of sea bottom, $T_{1/3}$: Incident wave period, $H_{1/3}$: Incident wave height, h_t : Water depth at toe h_c : Crest height



Photo 3 Experimental conditions

데이터는 FFT를 사용하여, 각각 1/2과 32배에 해당하는 lower and upper cutoff frequency로써 band-pass filtering한다. 스펙트럼에 의한 개별파는 zero-up crossing method에 의해 band-pass filtering된 수면변동으로부터 결정하였다.

해양파랑의 스펙트럼 특성을 표현하는 계수로는 스펙트럼 모멘트(m_n)를 이용한 spectral width parameter ϵ (Cartwright and Longuet-Higgins, 1956) 및 ν (Longuet-Higgins, 1957)와 스펙트럼 첨예도계수(spectral peakedness parameter)인 Q_p (Goda, 1970)가 주로 사용되어 왔으며 다음 식으로 나타내어진다.

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (2)$$

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (3)$$

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^2 \quad (4)$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (5)$$

여기서, m_n 은 n 차 스펙트럼 모멘트이다. Rye(1979)의 연구에 따르면 ϵ 은 스펙트럼 피크가 첨예한 JONSWAP 스펙트럼과 Pierson-Moskowitz 스펙트럼이 잘 구별될 수 없고, 해석시 고주파수 대역선택에 따라 ϵ 의 값이 현저하게 변하는 반면에, Q_p 는 다양한 스펙트럼 형태를 구별할 수 있으며 ϵ 에 비해 안정된 계수라고 보고한 바 있다.

일반적으로 Q_p 는 파랑이 백색잡음일 때는 1.0의 값을, 스펙트럼의 피크가 뾰족할수록 큰 값을 나타내는데, 손병규(2001)는 우리나라 동해안 주전에서 관측되어진 3년간의 파랑데이터를 통해 현장의 Q_p 의 범위는 $3.0 < Q_p < 8.0$ 구간 내에 존재한다고 제안하였다. 본 실험에 대상파랑으로 사용된 불규칙파의 경우 대체로 $2.9 < Q_p < 4.92$ 의 범위 내에 존재하므로 본 실험연구는 현장의 Q_p 분포를 잘 재현시킨 것으로 판단된다.

3. 차원 해석

사석방파제 사면상의 수리역학적 특성에 영향을 주는 요소를 살펴보면, 유체의 성질 및 흐름의 특성, 구조물 형상 및 재질의 특성, 입사파랑 특성 등으로 구분할 수 있으나, 이들 조건을 모두 고려하여 정량화함에 있어서는 어려운 점이 많다.

그러나 각 실험별로 구조물의 특성을 동일하게 설정함으로써 고려해야할 인자를 줄일 수 있으며, 동일한 입경의 재질을 사용함으로써 구조물의 공극률을 일정하게 둘 수 있다. 따라서 차원해석을 통하여 사면상에서의 수리역학적 특성에 영향을 주는 변수들을 다음과 같은 무차원 함수식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{R_u}{H} \text{ or } \frac{R_d}{H} = f \left(\xi, K_r, \frac{Z_r}{H}, \frac{l}{L \sin \theta}, \frac{gT^2}{H}, \frac{\nu T}{H^2}, n_b, \frac{h_t}{H}, \dots \right) \quad (6)$$

여기서, R_u 과 R_d 는 사면상의 wave run-up과 run-down, Z_r , 투수하부층 두께, l 투수하부층 두께의 수평환산거리, ξ surf-similarity parameter, K_r , 반사계수, h_t toe 수심, H 입사파고, T 입사파 주기, L 입사파의 파장, θ 사면 경사각, n_b 제체내부의 공극률, ν 동점성계수, g 중력가속도이다. 본 연구에서는 동일한 재질의 사석을 사용함으로써 공극률에 따른 효과를 무시하였다.

4. Waterline의 변동특성

과고계 3점법에 의해 경사면 선단에서 입사파 분리된 입사파 시계열과 wave run-up gauge로부터 얻어진 waterline(물가선) 시계열간의 상관성을 살펴보기 위해 Run1(투수하부층 두께가 0.02 m)과 Run4(투수하부층 두께가 2.2 m)에 대한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

입사파 시계열에서 파고 특성을 가진 파랑이 입사하는 경우 waterline 시계열에서도 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있으나, 시계열의 파곡부분은 두 개의 시계열이 다른 양상을 나타낸다.

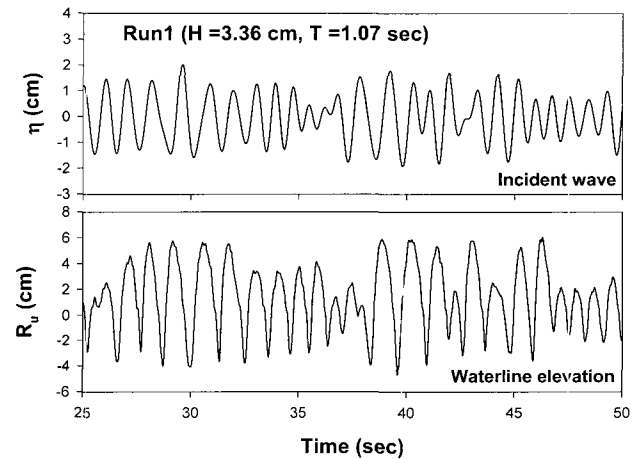


Fig. 3 Time series of incident wave and waterline elevation (Run1)

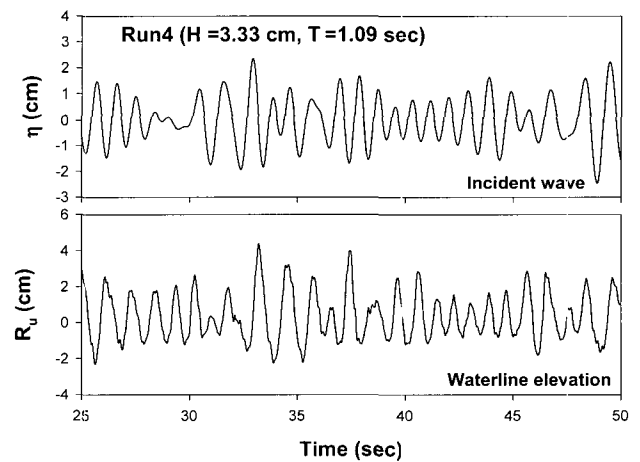


Fig. 4 Time series of incident wave and waterline elevation (Run4)

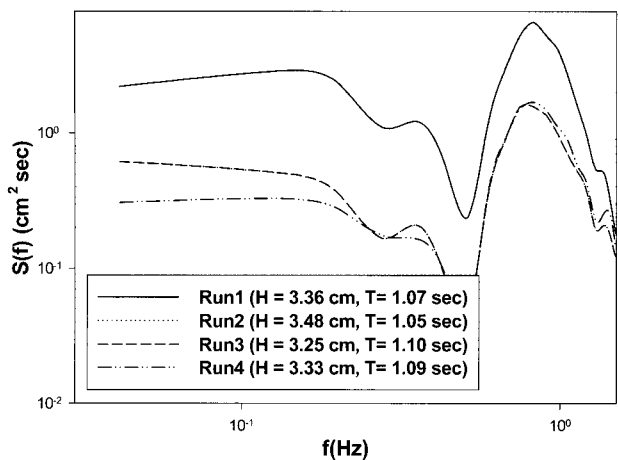


Fig. 5 Comparison of measured spectra of waterline elevation

즉, Run1의 경우 뾰족한 형태이고 Run4의 경우 둥근 형태를 나타내는데 이는 wave down-rush시 투수하부층 내부로부터 흘러나온 물(침출수)이 사면상의 waterline의 시계열 형상에 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 5은 4가지 실험에서 계속되어진 run-up 시계열의 스펙트럼을 나타내고 있다. 여기서 저주파수 영역에서 각 단면의 투수하부층 두께에 따른 장주기 파랑성분의 거동을 알 수 있다. 즉, 투수층의 두께가 클수록 장주기 파랑이 작은 에너지 밀도를 나타내고 있는데 이는 투수층의 두께가 에너지 소과의 효과로서 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

4. 반사파와 Wave run-up

수면변동 시계열을 바탕으로 각 주파수성분에 대한 반사파를 측정하기 위하여 반사율을 주파수대역에서의 입사파 스펙트럼밀도에 대한 반사파 스펙트럼밀도 비의 제곱근으로 정의할 때, 입사파와 반사파의 에너지는 각각 파고의 자승에 비례하므로 정의된 반사계수는 다음 식(7)과 같이 표현 가능하다.

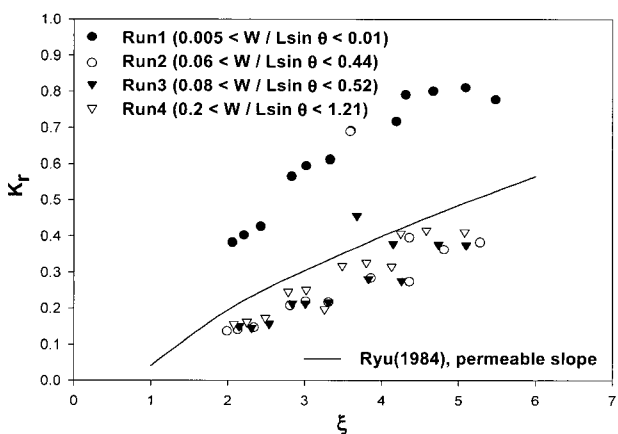


Fig. 6 Wave reflection (K_r) versus ξ

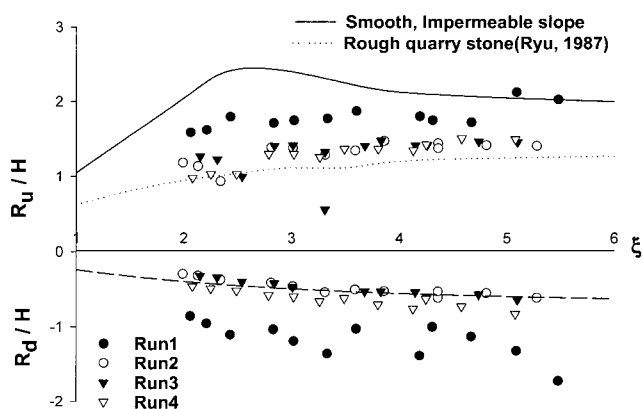


Fig. 7 Wave run-up (R_u/H) and run-down (R_d/H) versus ξ

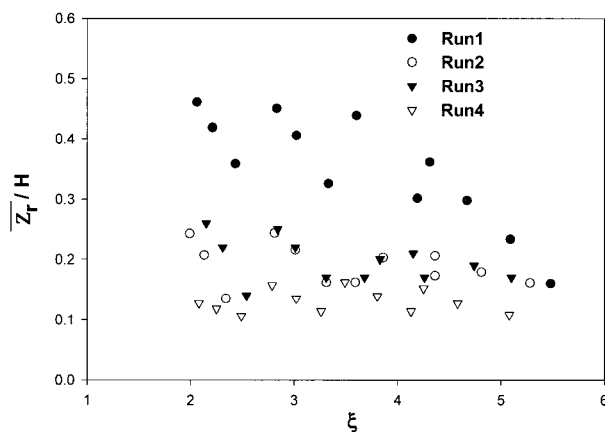


Fig. 8 Wave set-up (\bar{Z}_r/H) versus ξ

$$K_r = \sqrt{\frac{(m_o')_r}{m_o'}} \tag{7}$$

여기서, m_o' 와 $(m_o')_r$ 은 각각 입사파 스펙트럼 및 반사파 스펙트럼의 0차 모멘트이다. Fig. 6은 본 연구의 실험수행시 구조물에 의한 파랑의 반사특성을 나타낸 것이며, 그림에서 실선은 Ryu(1984)가 제안한 다음 식을 나타내고 있다.

$$K_r = 0.5 \left\{ \frac{(\xi - 2.65 \tan \theta)}{4.3} \right\}^{0.7} \tag{8}$$

실험에서 얻어진 반사계수는 Ryu(1984)의 결과에 비해 과소 평가되지만 경향은 비슷한 양상을 나타내고 있다. 실험결과에서 2 cm의 수평두께를 가진 단면의 경우가 다른 단면에 비해 상대적으로 반사율이 크게 나타나고 있으며 그 외 다른 단면의 경우는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이로부터 단면의 최단거리 폭이 $0.01 < W/L\sin \theta < 0.06$ 의 사이에서 투수층과 거칠은 사면과의 반사특성이 존재할 것이라 판단되며, 투수하부층이 작아 피복층으로서의 형태를 가질 경우 구조물의 투수성보다는 조도계수의 영향이 크게 나타날 것으로 생각된다.

Fig. 7은 사면상에서 측정된 wave run-up을 나타낸 것으로 불투수성 사면과 투수성 사면상의 wave run-up은 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 투수하부층 두께 특성

사석방파제의 투수하부층 두께에 따른 사면상의 wave set-up의 특성을 살펴보기 위해 나타낸 그림이 Fig. 8과 Fig. 9이다. Fig. 8은 surf-similarity parameter(ξ)와 사면상의 wave set-up의 비교를 나타낸 것으로 투수하부층 두께가 증가함에 따라 사면상의 wave set-up이 감소함을 알 수 있으나, ξ 가 증가함에 따라서는 wave set-up이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 이는 구조물에 입사하는 파랑이 장파인 경우 구조물의 영향을 적게 받는다는 Losada *et al.*(1997)의 연구결과와 일치함을 나타내고 있다.

Fig. 9는 투수하부층 두께와 사면상 소상파고와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 투수하부층 두께($W/L\sin\theta$)가 커짐에 따라서 상대소상파고가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 투수층 투수효과가 구조물의 폭에 따라서 영향을 받는다는 것을

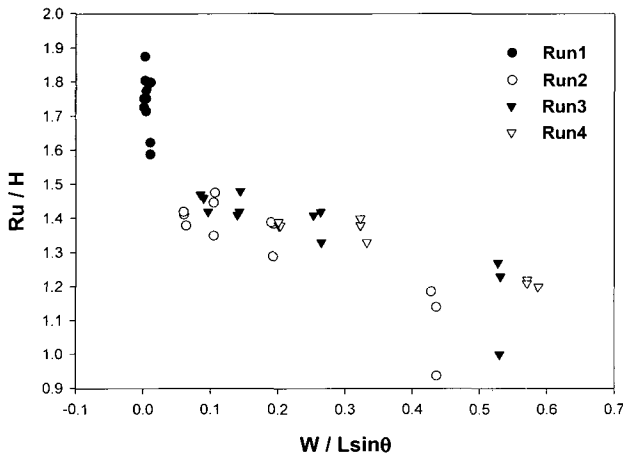


Fig. 9 Wave run-up (R_u/H) versus permeable underlayer thickness

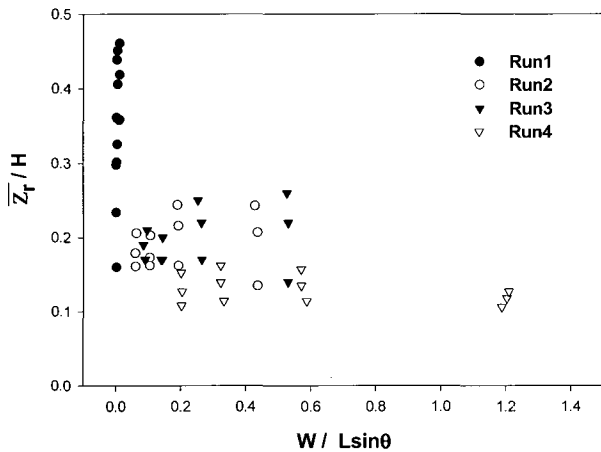


Fig. 10 Wave set-up (\bar{Z}_r/H) versus permeable underlayer thickness

의미하는 것으로 투수층의 폭이 커질수록 소상파고는 반비례적으로 감소하고 있음을 나타낸다. 또한 Fig. 10은 투수하부층 두께와 사면상의 wave set-up에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 투수하부층 두께가 커질수록 사면상의 wave set-up도 줄어드는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 사석구조물의 투수하부층 두께변화에 따른 사면상의 소상파, 반사, 사면상의 wave set-up 등 수리역학적 현상 규명을 위한 불규칙파 수리모형실험을 수행하고, 실험결과를 바탕으로 투수하부층 두께가 사면상의 수리특성에 미치는 영향에 대해서 논의하였다. 수리실험을 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 투수하부층의 크기가 커질수록 사면상의 wave down-rush 시 투수층 내부로부터의 침출수에 의해 사면상의 wave run-down의 시계열이 크게 영향을 받는다.
- 2) 소상파 시계열의 스펙트럼 해석을 통해 저주파수 영역에서 각 단면의 투수층 두께에 따른 장주기파랑 성분의 거동을 알 수 있다. 즉, 투수하부층 두께가 클수록 장주기파랑이 작은 에너지 밀도를 나타내고 있는데 이는 투수하부층 두께가 에너지 소파의 효과로서 영향을 미치지 않기 때문으로 판단된다.
- 3) 투수하부층 두께가 $0.01 < W/L\sin\theta < 0.06$ 인 범위내에서 투수층과 거칠은 사면과의 반사특성이 존재할 것이라 판단되며 투수층이 작아져 피복층에 가까워질수록 투수성보다는 조도계수의 영향을 크게 받는다.
- 4) 투수하부층 두께가 커짐에 따라서 상대소상파고는 작아지는 경향을 보이며, 투수하부층의 두께가 커질수록 소상파고는 반비례적으로 감소한다.

참 고 문 헌

김종욱 (2001). "투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용에 관한 수치모형 연구", 부경대학교 박사학위논문.
 손병규 (2001). "다방향불규칙파에 의한 사석방파제의 안정성에 관한 기초적 연구", 부경대학교 박사학위논문.
 전재우 (2000). "투과성 방파제의 내부수위 변동과 방파제의 수리특성", 부경대학교 석사학위논문.
 Ahrens, J.P. (1981). "Irregular wave run-up on smooth slopes", Coastal Engineering Research Center, pp 7-26.
 Bruun, P. (1985). "Design and construction of mounds for breakwaters and coastal problems", Coastal Eng., Vol 1, pp 28-380.
 Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S. (1956). "The statistical distribution of the maxima of random function", Proc. Soc. London, Ser. A, Vol 237, pp 212-232.

- Goda, Y. (1970). "Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation", Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol 9, No 3, pp 3-57.
- Kobayashi, N. (1986). "Wave reflection and run-up on rough slopes", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol 113, pp 282-298.
- Longuet-Higgins, M.S. (1957). "The statistical analysis of a random, moving surface", Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A(966), Vol 249, pp 321-387.
- Losada, I.J., Losada, M.A. and Martin, F.L. (1997). "Experimental study of wave induced in a porous structure", Coastal Eng., Vol 26, pp 77-98.
- Losada, M.A. and Gimenez-Curto, L. A., (1981). "Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action", Coastal Eng., pp 187-206.
- Rye, H. (1979). "Wave parameters studies and wave groups", Proc. Int. Conf. Sea Climatology, Paris, pp 79-112.
- Ryu, C.R. (1984). "A study on the hydraulic optimal design of the rubble mound breakwaters", Thesis of Doctor of Eng., Osaka Univ.
- Van Gent, M.R.A., Tonjes, P. and Petit, H.A.H. (1994). "Wave action on and in permeable structures", ASCE, pp 1739-1753.

2001년 12월 10일 원고 접수

2002년 5월 31일 최종 수정본 채택