

사석방파제 투수층 두께에 따른 사면상의 수리특성에 관한 실험연구

윤한삼 · 남인식 · 김종욱* · 류청로
부경대학교 해양공학부, 현대중공업(주) 선박해양연구소*

Experimental study for Hydraulic Characteristics as the Permeable underlayer width of Rubble Mound Structure

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

School of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

* Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., Ulsan 682-792, Korea

KEY WORDS: Rubble Mound Structure 사석방파제, Hydraulic characteristics 수리특성, Wave run-up 소상파, 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 width 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 width increased, relative wave run-up decreased.

1. 서 론

해안구조물설계시 입사파랑의 불규칙성과 아울러 구조물의 형상 및 투수성을 함께 고려해야한다. 외해에서 발생되어진 심해파랑이 천해역으로 침입하는 경우 천수, 굴절 등의 파랑변형효과를 나타냄과 동시에 해안구조물로 인해 반사하여 복잡한 파랑장을 조성하게 되는데 사석방파제와 같이 재질이 투수성을 가지는 경우에는 구조물 내부로의 침투 효과로 인해 더욱 복잡한 현상을 나타낸다.

일반적으로 경사제 방파제 설계시 설계인자로 사용되어지는 소상파고는 구조물의 천단을 결정함에 있어 주요 인자이며, 또한 구조물에 의한 파랑의 반사는 구조물 주변에서의 파동장을 결정하는 중요한 인자이다. 기존 많은 연구자들에 의해 불규칙한 해양파랑을 대상으로 한 수리모형실험이 광범위하게 수행되어졌다고 할지라도 경사제 구조물 전면으로 침입하는 불규칙파랑과 소상파고 및 반사에 대한 수리역학적 과정에 대한 정량적 평가는 아직 경험적으로 이해하는 수준이며, 시계열과 스펙트럼 파라메타에 대한 연구결과도 아직 미흡하다고 보고된 바 있다(Bruun, 1985).

이러한 사면상의 수위변동을 예측하기 위해 Kobayashi et al.(1986, 1987, 1991)는 유한진폭 천해파 방정식을 토대로 시간의존 수치모델을 개발하여 매끄러운 불투과 경사면, 거친 불투과 경사면 및 임의 투수층을 가진 경사면인 경우에 대해 사면상의 수리역학적 특성인 반사파와 wave run-up을 재현하였다.

또한 얇은 투과하부층을 가진 1:3 거친 경사면상의 불규칙 반사파와 run-up에 대한 3가지의 불규칙파 실험결과를 사용하여 검증한 바 있다.

그러나 구조물의 투수층 폭의 변화에 따른 사면상의 wave run-up, 파의 반사, 사면상의 set-up과 같은 수리역학적 논의는 미흡한 실정으로 본 연구에서는 1/3 경사를 가진 사석방파제를 대상으로 불투과 거친 경사면과 임의 투수층 폭을 가진 경사면에 대해서 불규칙파 실험을 수행하고 이 결과를 바탕으로 투수층의 폭의 변화에 따른 사면상의 수리특성에 대해서 규명해보고자 한다.

2. 수리모형실험

본 연구에서는 해안구조물 사면상에서의 파랑변형특성중의 하나인 wave run-up이 구조물의 투수층의 유무 및 크고 작음에 따라서 어떻게 거동하는가를 알아보기 위해 급경사(1:3) 사면상에서 불규칙입사파랑을 대상으로 수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험은 폭이 1.0 m, 길이 35.0 m, 높이가 1.0 m인 2차원 조파수조내에 수조의 한쪽 끝에는 불규칙 조파기가 위치하고 1/40의 완만한 경사면 위에 1/3의 경사면을 설치하였다. Fig. 1은 수리모형실험에 사용된 구조물의 단면을 나타내고 있으며, toe부의 수심은 40 cm, 사석의 중앙입경은 2.0 cm로 모든 단면에 대해서 동일하게 설정하였다. 또한 그림에서와 같이 불투과사면은 베니아판을 이용하여 제작하였고 사면위에 사석을

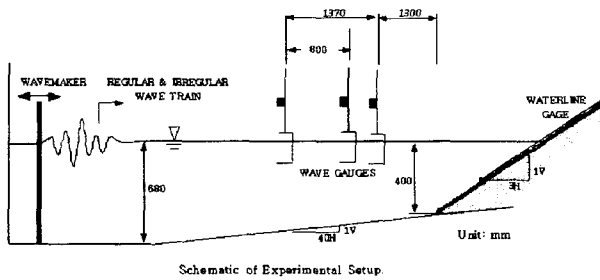
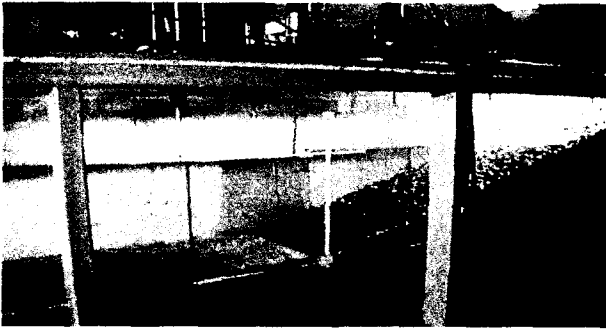


Fig. 1 Layout of experimental setup

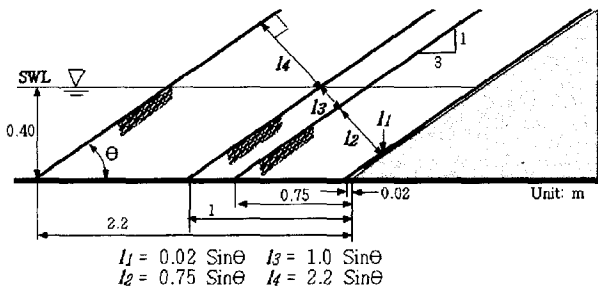


Fig. 2 Definition of permeable core thickness

부착시켜 놓았다. 단면의 수평폭은 0.02, 0.75, 1.0, 2.2 m로 하였으면 l_1, l_2, l_3, l_4 는 불투과사면으로부터 사면상에 수선을 내린 최단직선거리에 해당하는 것으로 각 단면의 투수층 두께를 의미한다. 각 단면의 투수층의 두께는 수평폭의 길이에 경사각을 곱하여 나타내며, 각각의 단면에 대해 Run1, Run2, Run3, Run4라고 부른다. 불규칙파의 시뮬레이션에서 목표로 하는 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼으로서 Pierson-Moskowitz spectrum에 첨예화 계수를 곱한 것으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, $S(f)_{PM}$ 는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼이고, γ = 첨예화 계수(1~7사이의 값을 가지며 평균 3.3을 취한다), $\beta = \exp[-(f-f_p)^2/2\sigma^2 f_p^2]$, ($\sigma_a=0.07$, $\sigma_b=0.09$)이며,

Phillips상수 α 는 0.0081이다.

조파수조에서 발생시킨 불규칙파에 의한 수위변동을 측정하기 위해 수조의 중앙을 따라 3개의 용량식 파고계를 경사면(1:3)의 전방에서 조파기 방향으로 $x'=0, 30, 90$ cm 간격으로 설치하였다. 또한 1:3 경사면에 길이 약 1m의 파고계(waterline meter)를 경사면과 평행하게 5 mm의 간격을 두고 설치하여 wave run-up을 측정하였다. 실험 값의 적절한 데이터 획득은 Goda의 지침서를 바탕으로 하였으며, 유효주파수 범위는 $0.11 \text{ Hz} < f_c' < 1.5 \text{ Hz}$ 이다.

Table 1 Experimental conditions

| Parameter | | 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_s (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_s : Incident wave period, $H_{1/3}$: Incident wave height, h_t : water depth at toe h_c : crest height,



Fig. 3 Set-up of waterline meter for Run1 case



Fig. 4 Set-up of waterline meter for Run2, Run3, Run4 case

평균수위는 기록된 수위변동의 평균에 의해서 주어지고, 파의 수위변동 데이터는 FFT를 사용하여, 각각 1/2과 32배에 해당하는 lower and upper cutoff frequency로써 band-pass filtering한다. 스펙트럼에 의한 개별파는 zero-upcrossing method에 의해 band-pass filtering된 수위변동으로부터 결정하였다. 수리모형실험에 사용된 구조물의 재원 및 대상파랑인 불규칙파랑의 주요 재원은 Table 1와 같다.

3. 차원해석

본 연구의 목적인 사석방파제의 투수층의 두께에 따른 사면상의 수리역학적 특성에 영향을 주는 요소를 살펴보면, 유체의 성질, 구조물 형상, 재료특성, 입사파랑 및 흐름의 특성 등으로 구분할 수 있으나, 이들 조건을 모두 고려하여 정량화함에 있어서는 어려운 점이 많다. 여기서 각 실험별로 구조물의 특성을 동일하게 설정함으로써 고려해야할 인자를 줄일 수 있는데, 동일한 입경의 재질을 사용함으로써 구조물의 공극률을 일정하게 둘 수 있다고 판단된다. 따라서 사면상에서의 수리역학적 특성에 영향을 주는 변수들을 차원해석을 통하여 다음과 같은 무차원 함수식을 얻었다.

$$\frac{Ru}{H} \text{ or } \frac{Rd}{H} = f \left(\xi, K_r, \frac{l}{L \sin \theta}, \frac{gT^2}{H}, \frac{\nu T}{H^2}, n_p, \frac{h_t}{H}, \dots \right) \quad (2)$$

여기서, ξ surf similarity parameter, K_r 은 반사계수, h_t toe에서의 수심, H 입사파고, T 입사파 주기, θ 사면의 경사각, n_p 는 체체내부의 공극률이다.

식(2)의 무차원 변수중에서 일부는 실험 방법과 조건에 따라 무시되거나 기존의 연구결과에 따라 그 영향이 아주 작을 때는 무시될 수 있다.

4. 시계열특성과 스펙트럼 특성

3점법에 의해 경사면 선단에서 입반사 분리된 입사파 시계열과 waterline meter로부터 얻어진 run-up 시계열간의 상관성을 현상적으로 살펴보기 위해 Run3(투수층의 두께가 1 m)와 Run4(투수층의 두께가 2.2 m)에 대한 결과를 그림 Fig 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그림으로부터 입사파 시계열에서 파군의 경향을 띄는 파랑이 입사하는 경우 run-up 시계열에서도 비슷한 경향을 가지는 것을 알 수 있으나, waterline elevation의 파곡부분은 두 개의 시계열이 다른 양상을 나타낸다. 즉 Run1의 경우 뾰족한 형태이고 Run4의 경우 둥근 형태를 나타내는데 이는 down-rush시 투수층내부로부터 흘러나온 물이 사면상의 run-up의 시계열의 형상에 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

해양파랑의 spectrum 형태특성을 표현하는 parameter로는 spectrum moment(m_n)를 이용한 spectral width parameter ξ

(Cartwright and Longuet-Higgins, 1956) 및 ν (Longuet-Higgins 1957)와 spectral peakedness parameter Q_p (Goda, 1970)가 주로 사용되어 왔으며 아래와 같은 식으로 나타내어진다.

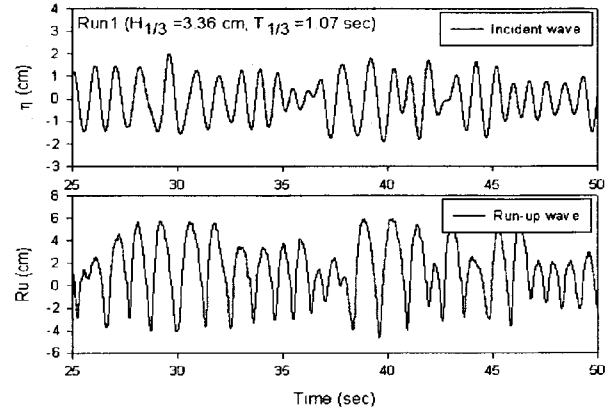


Fig. 5 Time series of incident wave, run-up for Run1 case

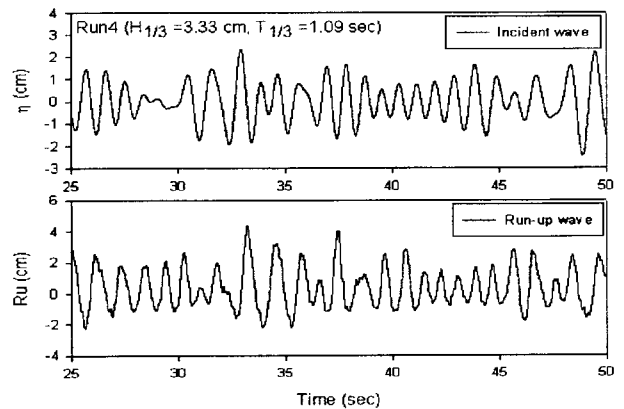


Fig. 6 Time series of incident wave, run-up for Run4 case

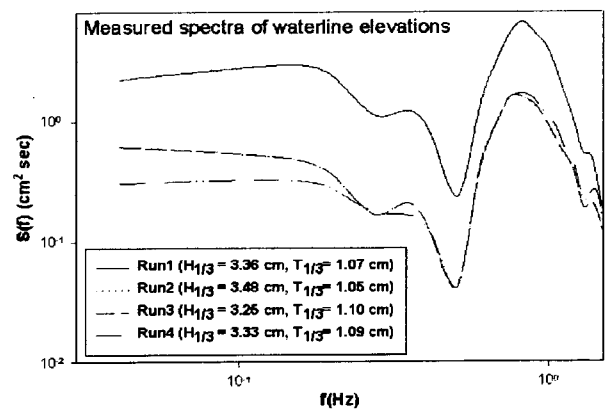


Fig. 7 Comparison of measured spectra of waterline elevation

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (3)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (4)$$

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^2 \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df \quad (6)$$

여기서, m_n 은 n 차 spectrum moment이고, ε 및 ν 는 파랑에 너지의 집중정도를 나타내는 spectral width parameter이며, Q_p 는 spectrum 형태의 첨예한 정도를 나타내는 parameter이다. Rye(1977)의 연구에 따르면 ε 는 spectrum peak가 첨예한 Jonswap spectrum과 Pierson-Moskowitz형 spectrum이 잘 구별될 수 없고 해석시 고주파수 cut-off choice에 따라 ε 의 값이 현저하게 변하며, 반면에 Q_p 는 다양한 spectrum 형태를 구별할 수 있으며 ε 에 비해 안정된 parameter라고 보고한 바 있다.

일반적으로 Q_p 는 백색잡음일 때는 1.0의 값을 취하고, 스펙트럼의 피크가 뾰족할수록 큰 값을 취한다. 손(2001)의 우리 나라 동해안 주전에서 관측되어진 3년간의 파고데이터를 통해 현장의 Q_p 의 범위는 $3.0 < Q_p < 8.0$ 구간 내에 존재함을 알 수 있으며 본 실험에 사용된 불규칙파의 simulation에서도 대체로 $2.9 < Q_p < 4.92$ 의 범위 내에 존재하므로 본 실험연구는 현장의 Q_p 분포를 잘 재현시킨 것으로 판단된다.

Fig. 7은 4가지 실험에서 측정되어진 run-up시계열의 스펙트럼을 나타내고 있다. 여기서 저주파수 영역에서 각 단면의 투수층 두께에 따른 장주기파랑 성분의 거동을 알 수 있다. 즉, 투수층의 두께가 클수록 장주기파랑이 작은 에너지 밀도를 나타내고 있는데 이는 투수층의 두께가 에너지 소파의 효과로서 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

5. 반사율과 wave run-up

실험에서 측정되어진 시계열을 바탕으로 주파수성분에 대한 파의 반사를 조사하기 위하여 반사계수를 주파수대역에서의 입사파 스펙트럼밀도에 대한 반사파 스펙트럼밀도 비의 제곱근으로 정의하고, 입사파와 반사파의 에너지는 각각 파고의 자승에 비례하므로 파고의 비로 정의된 반사계수는 다음 식과 같이 표현 가능하다.

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

여기서 m_o' 와 $(m_o')_r$ 은 각각 입사파 스펙트럼 및 반사파 스펙트럼의 0차 모멘트(zero moment)이다. Fig. 8은 실험결과로

부터 구조물에 작용하는 반사율의 특성을 나타낸 것인데 실선은 Ryu(1984)가 제안한 ξ 에 대한 다음 식과 비교하여 나타내었다.

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

그럼 결과로부터 실험에서 얻어진 반사율은 Ryu(1984)의 결과에 비해 과소평가되어졌지만 경향이 비슷한 양상을 나타내고 있다고 판단되며, 투수층의 두께에 따른 변화는 크게 두가지로 대별되는 것을 알 수 있다. 즉, 2cm의 수평두께를 가진 단면의 경우가 다른 단면에 비해 상대적으로 반사율이 크게 나타나고 있으며 그 외 다른 단면의 경우는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이를 통해 단면의 최단거리 폭이 $0.01 < l/L \sin \theta < 0.06$ 의 사이에서 투수층과 거칠은 사면과의 반사특성이 존재할 것이라고 판단되며, 투수층이 작아져 피복층으로서의 형태를 가질 경우 투수성보다는 조도계수의 영향이 크다.

Fig. 9는 사면상에서 측정된 wave run-up을 나타낸 것으로 불투과성 사면과 투과성 사면상의 run-up은 기존의 연구자 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 가 있다.

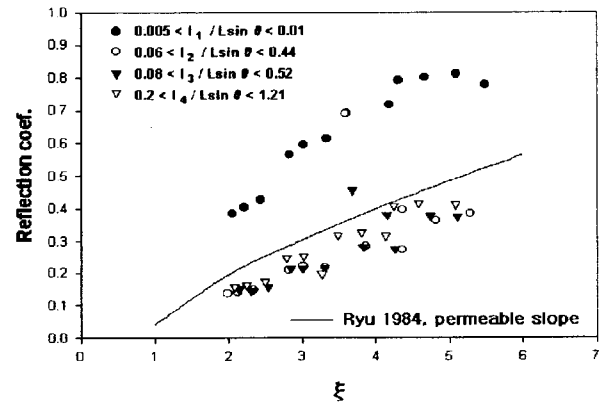


Fig. 8 Wave reflection(K_r) versus ξ

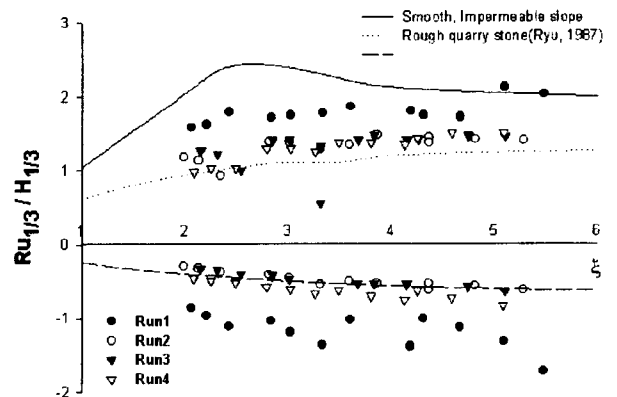


Fig. 9 Wave run-up(R_u) and run-down(R_d) versus ξ

6. 사면상의 wave set-up

사석방파제의 투수층 두께에 따른 영향을 고찰하기 위해서 나타낸 그림이 Fig. 10~Fig. 12이다. 그림 Fig. 10은 surf similarity parameter(ξ)와 사면상의 wave setup의 비교를 나타낸 것으로 투수층의 두께가 클에 따라서 사면상의 set-up이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있으며 ξ 가 커짐에 따라서 각 단면의 set-up이 거의 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 구조물에 입사하는 파랑이 장파인 경우 구조물의 영향을 적게 받는다는 Losada의 연구결과와 유사함을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 투수층의 두께(permeable core thickness)와 사면상의 wave run-up의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 투수층의 두께($l/L\sin\theta$)가 커짐에 따라서 상대 wave run-up이 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 투수층의 투수효과가 폭에 의해서도 영향을 미치는 것을 의미하는 것으로 투수층의 폭이 커질수록 소상파고는 반비례적으로 감소하고 있음을 나타낸다.

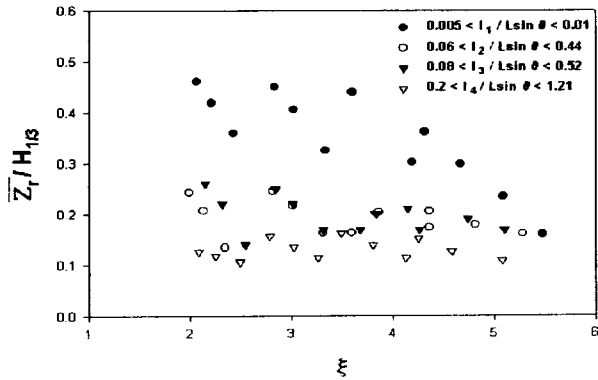


Fig. 10 Wave set-up(\bar{Z}_r) versus ξ

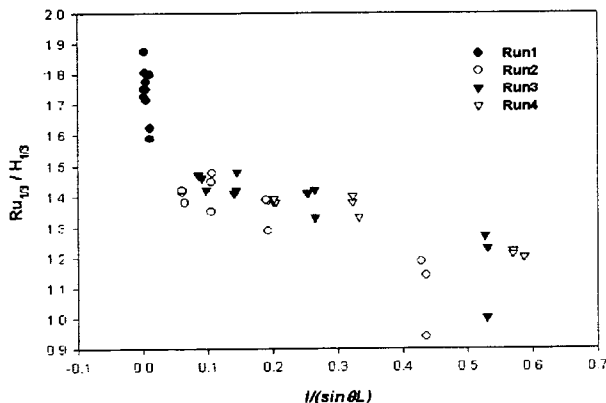


Fig. 11 Wave run-up(Ru) versus permeable core thickness

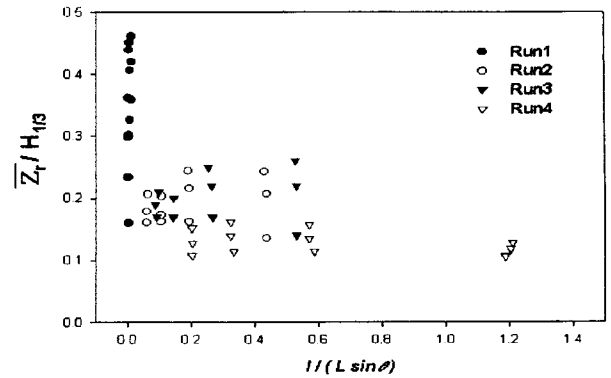


Fig. 12 Wave set-up(\bar{Z}_r) versus permeable core thickness

Fig. 12는 투수층의 두께와 사면상의 set-up에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 여기에서도 투수층의 폭이 커질수록 사면상의 set-up이 줄어드는 것을 알 수가 있다.

6. 결론

본 연구는 사석구조물의 투수층 폭의 변화에 따른 사면상의 wave run-up, 파의 반사, 사면상의 set-up과 같은 수리역학적 현상에 대한 실험을 수행하고 이를 바탕으로 투수층의 폭이 사면상의 수리특성에 미치는 영향에 대해서 논의하였다. 수리실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 투수층이 존재하는 경우 사면상의 down-rush시 투수층내부로부터 흘러나온 물에 의해 사면상의 run-down의 시계열이 영향을 받는다.
- 2) run-up시계열의 스펙트럼 해석을 통해 저주파수 영역에서 각 단면의 투수층 두께에 따른 장주기파랑 성분의 거동을 알 수 있다. 즉, 투수층의 두께가 클수록 장주기파랑이 작은 에너지 밀도를 나타내고 있는데 이는 투수층의 두께가 에너지 소파의 효과로서 영향을 미치기 때문으로 판단된다.
- 3) 단면의 최단거리 폭이 $0.01 < l/L\sin\theta < 0.06$ 의 범위내에서 투수층과 거칠은 사면과의 반사특성이 존재할 것이라고 판단되면 투수층이 작아져 피복층으로서의 형태를 가질 경우 투수성보다는 조도계수의 영향이 크다.
- 4) 투수층의 두께($l/L\sin\theta$)가 커짐에 따라서 상대 wave run-up이 작아지는 경향을 보이는데, 이는 투수층의 투수효과가 폭에 의해서도 영향을 미치는 것을 의미하는 것으로 투수층의 폭이 커질수록 소상파고는 반비례적으로 감소하고 있음을 나타낸다.

참고문헌

- Ahrens, J.P.(1981). "Irregular wave run-up on smooth slopes", Coastal Engineering Research Center, December.

- Bruun(1985). "Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Problems", Vol.1, No. *, pp *~*.
- Kobayashi, N.(1986). "Wave Reflection and Run-up on Rough Slopes", J. of waterway, port, Coastal and Ocean Eng.,Vol. 113, pp 282~298.
- Losada, I.J., Losada, M.A., Martin, F.L.(1997). "Experimental study of wave induced in a porous structure", Coastal Engineering, Vol. 26, pp 77-98.
- Losada, M.A., Luis, A. Gimenez-Curto(1981). "Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action", Coastal Eng., pp 187~206.
- Ryu, C.R.(1984). "A study on the hydraulic optimal design of the rubble mound breakwaters", Thesis of Doctor of Eng., Osaka Univ., P 165.
- Van Gent, M.R.A., Tonjes, P., Petit, H.A.H.(1994). "Wave action on and in permeable structures", ASCE, pp 1739~1753.
- 손병규(2001), "다방향불규칙파에 의한 사석방파제의 안정성에 관한 기초적 연구", 부경대학교 박사논문, P 187.