

투과성 방파제의 내부수위 변동과 방파제의 수리특성

전재우* · 윤한삼** · 류청로*
 *부경대학교 해양공학과, ** (주)한국연안개발기술

Hydraulic Characteristics of Permeable Breakwater in Relation to the Internal Waterlevel Fluctuation

JAE-WOO JEON*, HAN-SAM YOON** AND CHEONG-RO RYU*
 *Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
 **Korea Coastal Development Technology Co., Ltd., Seoul, Korea

KEY WORDS: Interaction Characteristics 상호작용특성, Permeable Breakwater 사석방파제, Internal Waterlevel Fluctuation 내부수위변동, Lower Permeability 저투수성, Grouping Characteristics 파군특성, Hydraulic Characteristics 수리특성, Wave Run-up 소상파고

ABSTRACT: In the study, the interaction characteristics among incident waves, run-up and internal waterlevel at core layer of breakwaters were investigated. The effect of core materials on the internal waterlevel characteristics are also discussed using the results with both regular and irregular wave tests. The main results obtained are as follows; The higher internal waterlevel was observed under the permeable breakwater with core layer of the lower permeability than with the higher one. And, the internal waterlevel decreased as far as the distance from the toe. In the irregular wave test, the grouping characteristics of incident waves make large fluctuation of the waterlevel. Especially, breakwaters internal waterlevel appeared to affect the hydraulic characteristics on slope.

1. 서 론

일반적으로 사석방파제는 투과성 구조물로서 수리학적 특성상 외부의 흐름과 내부의 흐름으로 구분된다(Losada *et al.*, 1981). 기존의 사석방파제 사면상의 수리학적 특성에 대한 연구는 방파제 안정성 평가와 관련하여 비교적 다양한 형태로 수행되었다(Ryu, 1984; Bruun, 1985; Battjes, 1974; Ahrens *et al.*, 1985).

특히 사면상의 수리특성을 나타내는 Wave run-up(소상파고)은 구조물 자체의 투수성과 조도에 영향을 받는 것으로 지적된 바 있으며, Ryu(1984)는 사석방파제 내부부의 침투류 특성이 소상고와 반사파 등 사면상의 수리특성에 영향을 미치고 있음을 지적하였다. 이러한 방파제 내부의 수위변동 특성과 외력인자인 입사파랑과의 연관성을 밝히는 연구의 필요성에 따라 현장연구 및 수치모델 개발연구가 활발히 진행되고 있다(Holscher *et al.*, 1988; Kobayashi, 1986; Van Gent *et al.*, 1994).

그러나 방파제 외부의 불규칙 외력인자에 대한 내부수위의 변동특성을 정량적으로 나타낸 연구 또는 내부수위에 영향을 미치는 물리적인 영향인자에 대한 실험적 검토 및 영향인자들간의 상호작용을 설명할 수 있는 연구는 아직 미흡한 실정이다(전재우, 2000; Losada *et al.*, 1997; Van der Meer, 1988).

따라서 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 투수성이 다른 재

료에 대하여 방파제 내부수위의 변동특성을 파악하고, 내부수위가 사면상의 수리특성에 미치는 영향에 대해서 입사파랑의 불규칙성과 관련지어 규명하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1. 영향인자의 분석과 해석

Fig. 1에서 방파제내 정수면상의 수면고인 방파제 내부수위변동(internal waterlevel fluctuation)을 파랑작용 전의 정수면 상태에서부터 파랑작용 후의 연직 평균수면상승고로 정의할 때, 투과성 사석방파제의 체내 내부수위변동(η_p)을 지배하는 주요 영향인자로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_p(q) = f(H, T, L_0, \rho_w, \rho_r, \mu, g, h_0, V_w, l_a, l_c, \theta, e, q, \dots) \quad (1)$$

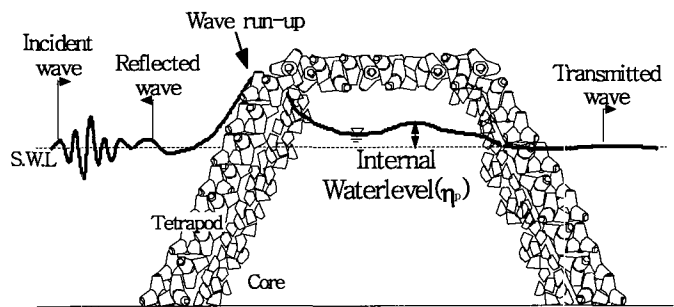


Fig. 1 Definition of internal waterlevel(η_p)

식(1)을 버킹검 π 정리에 의해 무차원화하고 표면장력의 효과를 무시하면 내부수위(η_p)에 대한 무차원량은 다음과 같다.

$$\frac{\eta_p}{H} = f' \left(\frac{V_w l_a / \nu, h_0 / H, T \sqrt{g / h_0}, \xi, x / L_0,}{l_a / h_0, e, q l_c / \nu, q / \sqrt{g l_c}, k / U_{max}} \right) \quad (2)$$

여기서, ξ surf-similarity parameter, H 입사파고, T 입사파주기, L_0 심해파장, ρ_w 해수 밀도, ρ_r 피복석의 밀도, μ 표면장력, g 중력 가속도, h_0 방파제 선단(toe)의 수심, V_w 사면상의 수립자 속도, l_a 피복석의 대표길이, l_c core부 재료의 대표길이, θ 방파제 사면경사, e core부 재료의 공극률(%), q 침투류의 걸보기 유속, k core부 재료의 투수계수, x 방파제 선단으로부터의 방파제 내부로의 수평거리, U_{max} 사면상의 수립자 최대속도, ν 는 동점성계수이다.

본 연구는 제체 내부의 투수성에 의한 내부수위변동 특성과 사면상의 수리특성과의 상호작용을 살펴보기 위해 내부의 투수성을 변화시킴으로써 Froude상사칙에 의해 모형을 축소하였다.

2.2. Core부의 투수계수 측정

Core부의 투수성이 방파제 내부수위의 변동에 영향을 미치므로 본 실험에서 사용되는 각 core부 재료의 투수계수를 측정하여 방파제 내부흐름 상태를 파악할 수 있는 기준으로 정하였다. 이를 위해 정수두 투수실험을 수행하였으며 조건은 Table 1에, 실험에 따른 core부 재료의 투수계수 측정결과는 Fig. 2에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 core부 재료의 중앙입경이 커질

Table 1 Conditions and results of permeability test

Stone size (d_{50} , cm)	Density, ρ_r (g/cm ³)	Porosity, e (%)	Permeability, k (cm/sec)
0.15	2.58	44.00	1.10
0.70	3.00	45.83	6.00
1.05	2.90	43.30	7.46
1.35	2.80	44.00	9.09
1.71	2.82	44.10	10.64
2.23	2.70	43.30	12.54
2.95	2.93	45.80	14.52

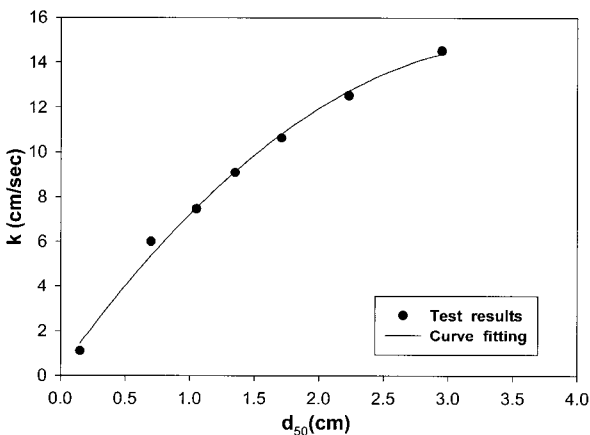


Fig. 2 Permeability(k) as representative diameter of stone

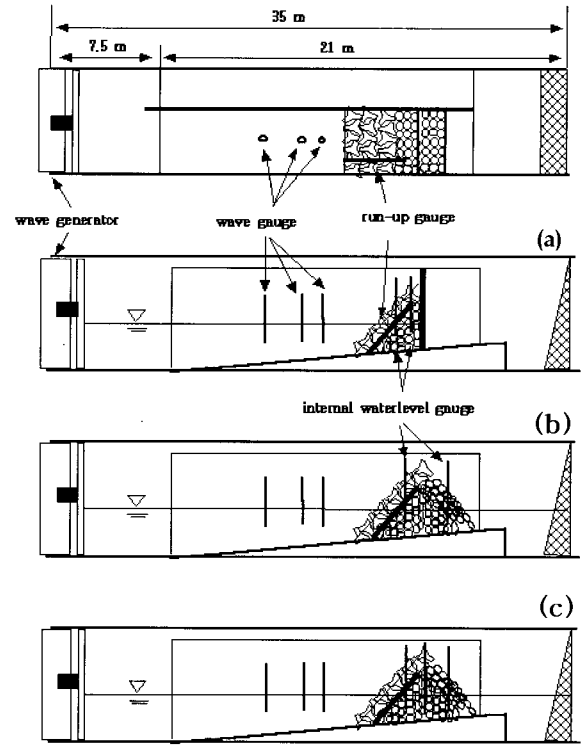


Fig. 3 Layout of test flume

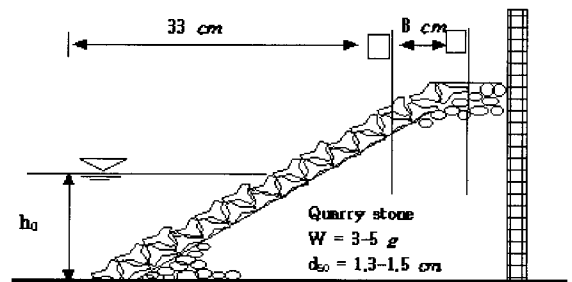


Fig. 4 (a) Semi-permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

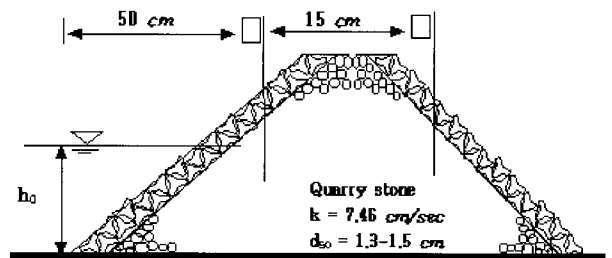


Fig. 4 (b) Permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

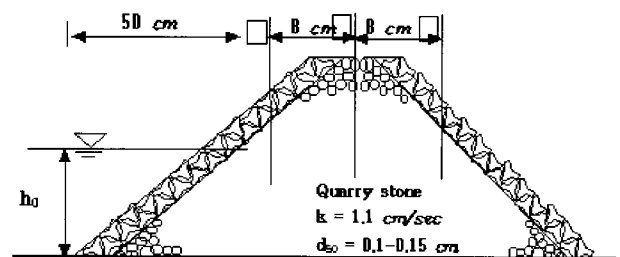


Fig. 4 (c) Permeable breakwater ($k=1.1$ cm/sec)

수록 투수계수도 커지는 경향을 나타내고 있다.

2.3. 실험장치와 실험조건

본 실험은 Fig. 3에서와 같이 저면경사가 1:40인 2차원 조파수조(길이 35 m, 폭 1 m, 높이 1 m) 경사면 위에 방파제 모형을 설치하였다. 모형단면은 Fig. 4(a)~(c)와 같이 투과성 사석구조물의 대표적 3가지 단면을 선정하였고, core부 사석은 투수계수(k)가 7.46인 $d_{50}=1.05$ cm을 사용하였다(Table 2).

실험대상 파랑은 불규칙파와 규칙파로 주기 0.8~1.2 sec, 파고 2~10 cm이며, 불규칙파의 목표스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼이다. 입사하는 파랑의 계측은 3개의 용량식 파고계를 방파제 전면면에 설치하여 계측하였고, 소상파는 피복 테트라포트(T.T.P)와 core사이에 설치된 1개의 소상파고계로, 내부수위변동은 core내부에 설치된 2개의 내부수위계를 사용하여 계측하였다.

Table 2 Experimental conditions of wave and breakwater models

General conditions	Model conditions			Wave conditions			
	Semi-permeable B.W. ($k=7.46$ cm/sec)	Permeable B.W. ($k=7.46$ cm/sec)	Permeable B.W. ($k=1.1$ cm/sec)	Regular		Irregular	
				H (cm)	T (sec)	H_s (cm)	T_p (sec)
W_a	14.6	14.6	14.6				
W_c	3~5	3~5	3~5				
θ	1:1.5	1:1.5	1:1.5	2	0.8	2	0.8
h_o	15.0	15.0	15.0	~	~	~	~
h_c	non overtopping	non overtopping	non overtopping				
Bottom slope	1:40	1:40	1:40				

W_a Weight of tetrapod for revetment(g); W_c Weight of core(g); h_o Water depth at the toe(cm); h_c Crown height of breakwater; k Permeability of core material(cm/sec); θ Slope of breakwater

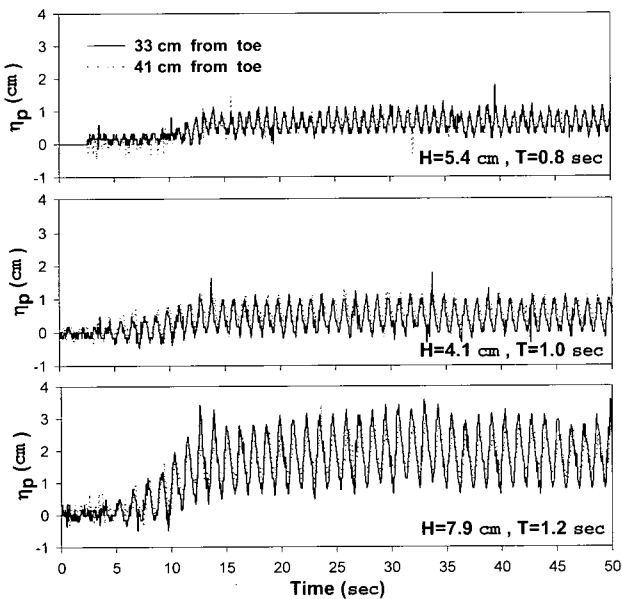


Fig. 5 Internal waterlevel of semi-permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

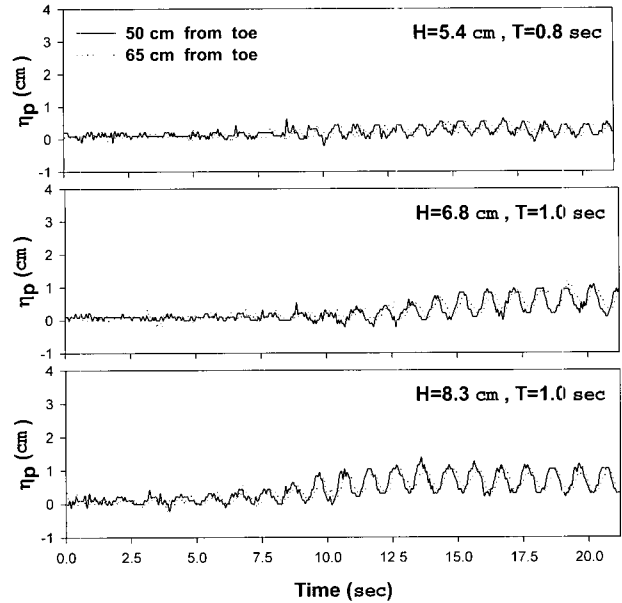


Fig. 6 Internal waterlevel of permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

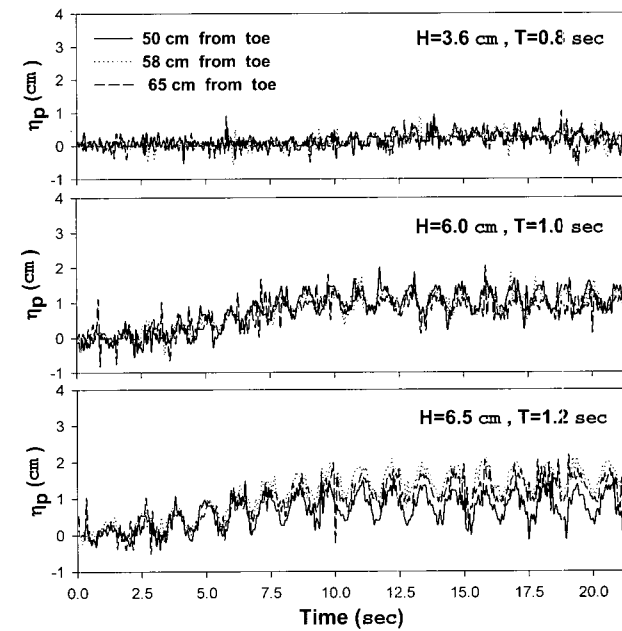


Fig. 7 Internal waterlevel of permeable breakwater ($k=1.1$ cm/sec)

3. 규칙파 실험결과

3.1. 내부수위의 시계열 특성

입사파랑에 의한 체체 내부의 평균수위 상승효과를 살펴보기 위해 조파전부터 내부수위의 시계열을 측정하여 Fig. 5~Fig. 7에 나타내었다. 시계열을 통해서 살펴본 결과, core부의 투수성 차이에 따라서, 또는 입사파의 조건에 따라서 평균수위 상승현상이 현저하게 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 체체 내부수위 상승은 내부의 재료특성인 투수성에 의해 투수성이 작을수록 내부수위 상승이 더 높게 나타났다. 특히 체체 내부의 수위변동에서 입사파랑의 특성이 체체 내부의 시계열에서도 나타나고 있음을

알 수 있다. 이것은 제체 내부에서도 입사파랑과 같은 수위변동이 발생하여 제체 내부의 압력변동이 발생하게 되고, 평균내부수위상승량이 입사파의 파고와 주기에 따라 변동한다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 내부수위 상승이 사면상의 수리현상과 안정성에도 영향을 미치게 될 것으로 사료된다.

또한 semi-permeable breakwater의 경우 투수계수가 큰 재료를 사용하였음에도 수위상승량이 높게 나타나고 있는데 이는 배후의 불투과벽에 의해 흐름이 자유롭지 못하여 제체 내부의 수위상승에 영향을 미치게 때문으로 판단된다. 이를 통해 배후에 뒤편채움재가 존재하는 경우, 특히 불투과성 재료로 구성되어질 경우에는 구조물 내부의 수위상승을 더욱 크게 초래할 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 사면상의 수리특성

일반적으로 사석방파제에 작용하는 파는 부분중복파이고 입사파와 반사파는 구조물의 형상과 사면경사 및 입사파의 특성에 따라 변한다. 반사율과 소상파로서 사면상의 수리특성을 살펴 보았는데 반사율은 $K_r = H_r / H_i$ (여기서, K_r 반사율, H_r 반사파고, H_i 입사파고)를 사용하였다(Dean et al., 1984).

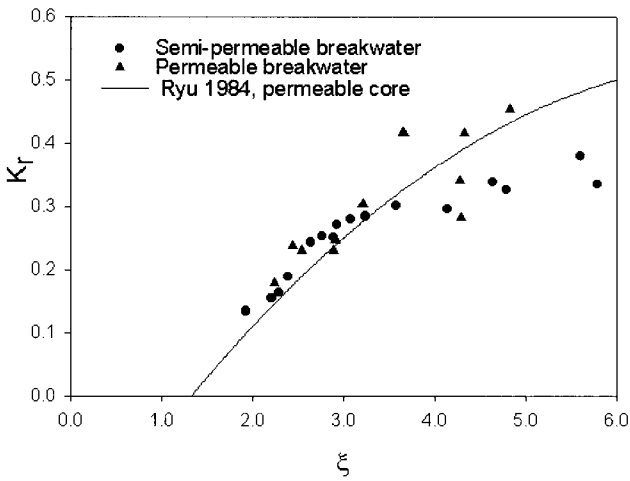


Fig. 8 Wave reflection(K_r) versus ξ

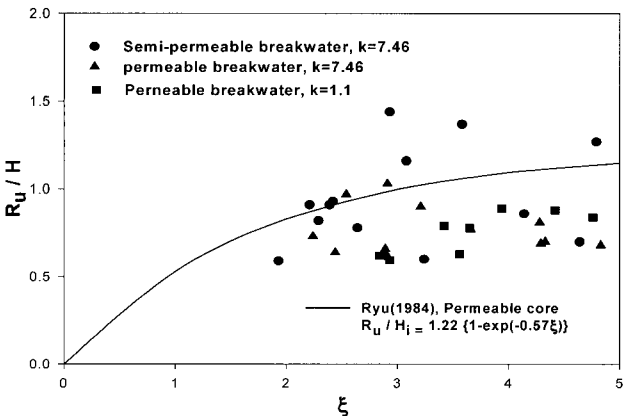


Fig. 9 Run-up(R_u/H) versus ξ

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 ξ 에 대한 반사율(K_r)과 상대소상파고와의 관계를 나타낸 것으로 Ryu(1984)의 투과성 구조물 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

3.3. 내부수위변동 특성 해석

입사파랑과 내부수위와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 ξ 가 증가할수록 내부수위가 증가하나 $\xi > 4$ 에서는 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 기존 소상파 연구결과(Ryu, 1984)와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 내부수위의 변동이 소상파와 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

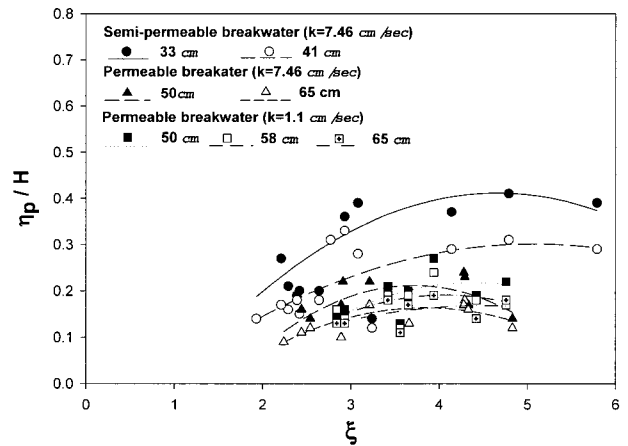


Fig. 10 Internal waterlevel(η_p/H) versus ξ

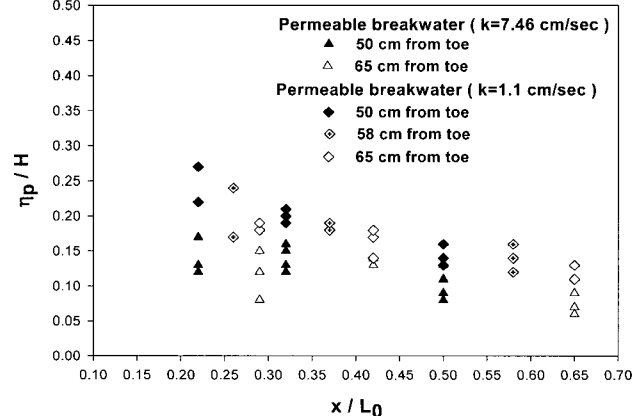
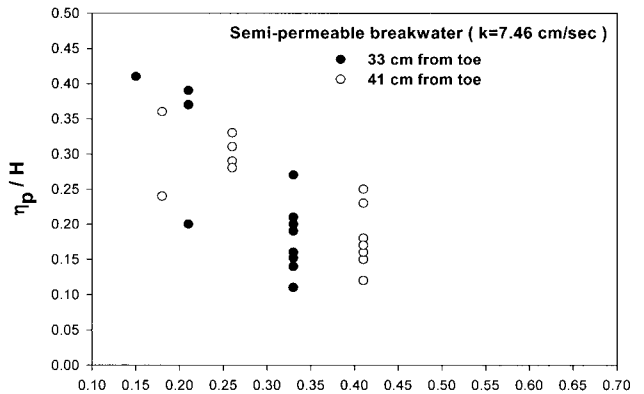


Fig. 11 Internal waterlevel change as internal location

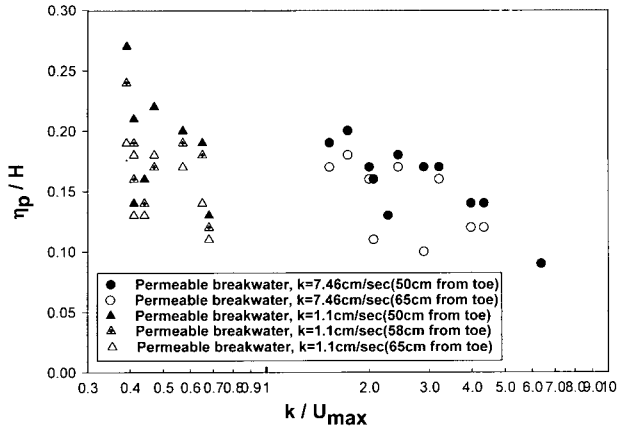


Fig. 12 Internal waterlevel (η_p/H) versus permeability (k/U_{max})

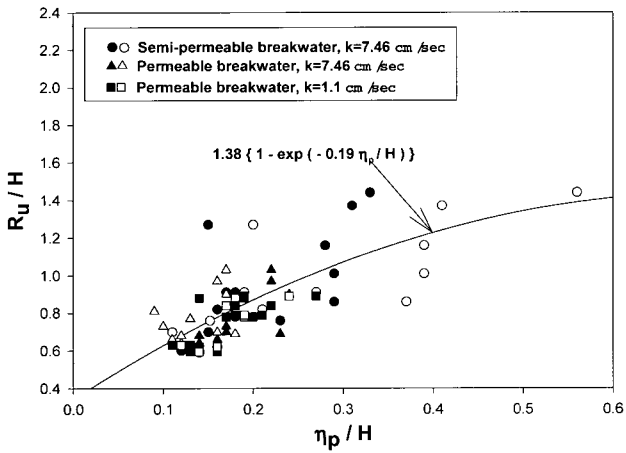


Fig. 13 Internal waterlevel (η_p/H) versus run-up (R_u/H)

또한 제체 내부의 위치에 따른 수위변동을 살펴보기 위해 상대투과길이에 대한 상대내부수위와의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 제체 내부로 갈수록 내부수위는 감소하고 제체 내부의 상하수위변동은 제체 앞부분에서 더욱 심하게 나타나는데, 이러한 변동이 사면상의 수리특성에도 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한 각각의 위치별 평균내부수위들간의 상관계수는 $k=7.46$ 인 경우 33 cm와 41 cm의 두 내부수위간에 상관계수(γ)는 0.57, $k=1.1$ 인 경우 50 cm와 58 cm는 0.83, 58 cm와 65 cm는 0.72, 50 cm와 65 cm는 0.86으로 투수계수가 작을수록 상관계수가 크게 나타났다.

Fig. 12는 상대내부수위와 상대투수계수와의 관계를 나타낸 것으로 투수계수가 증가할수록 내부수위가 감소하고 있음을 알 수 있고 최소자승법에 의해 다음 식(3)과 같은 관계를 가지며 상관계수는 0.62로 나타났다. 이는 제체 내부의 투수성이 내부수위의 변동에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로 방파제 설계시 core부 재료의 선택이 중요함을 의미한다.

$$\eta_p/H = -0.08(k/U_{max}) + 0.175 \quad (3)$$

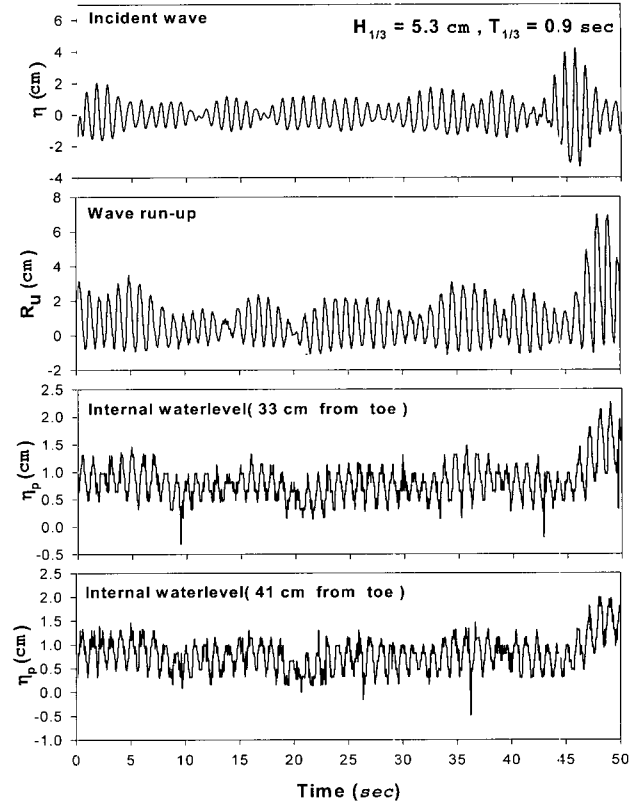


Fig. 14 Comparison of time series of semi-permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

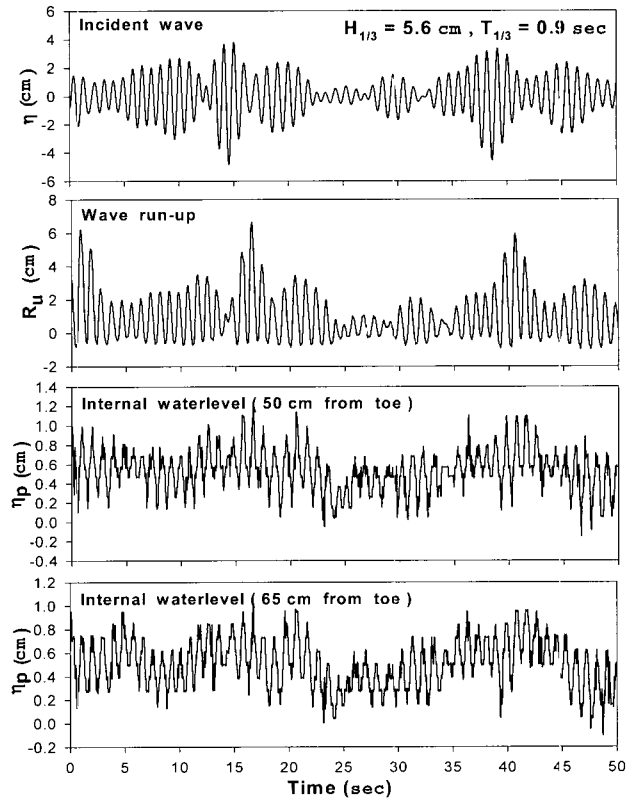


Fig. 15 Comparison of time series of permeable breakwater ($k=7.46$ cm/sec)

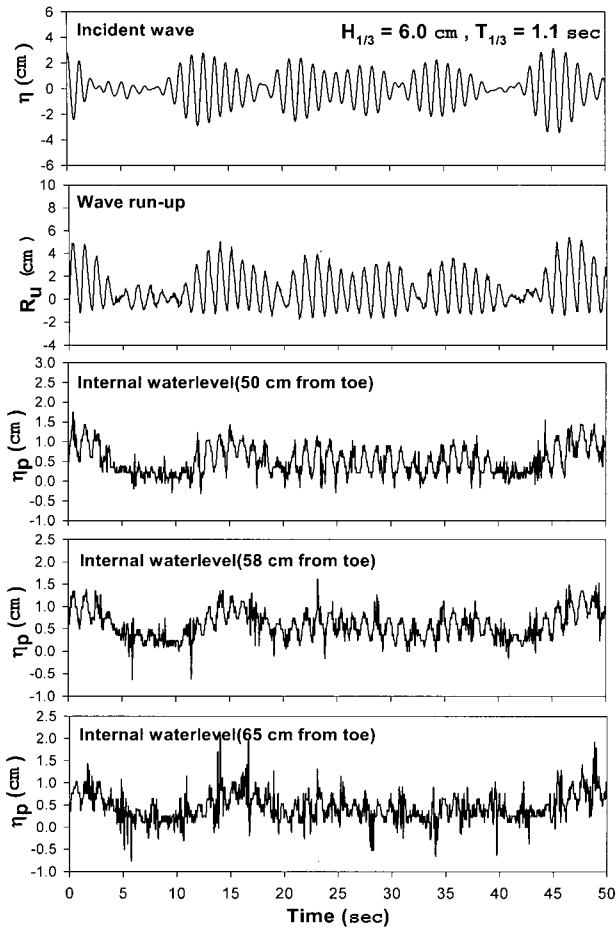


Fig. 16 Comparison of time series of permeable breakwater (k=1.1 cm/sec)

Fig. 13은 상대내부수위와 상대소상파고와의 관계를 나타낸 것으로 전체적으로 비례관계를 나타내며, 이를 통해 제체 내부수위는 사면상의 소상파와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 최소자승법에 의해 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 상관계수(γ)는 0.72로 나타났다.

$$\frac{R_u}{H} = 1.38 \left\{ 1 - \exp\left(-0.91 \frac{\eta_p}{H}\right) \right\} \quad (4)$$

4. 불규칙파 실험결과

4.1. 불규칙파의 시계열 특성과 스펙트럼 특성

Fig. 14~Fig. 16은 불규칙파의 시계열 특성을 나타낸 것으로 입사파랑의 시계열과 사면상의 소상파 시계열을 함께 나타내었다. 불규칙파의 경우는 제체 내부의 수위변동폭은 규칙파의 실험결과와 비슷하게 나타나고 있으며 입사파의 파군형태가 제체 내부의 수위변동특성에 그대로 전달되고 있음을 알 수 있다.

내부수위시계열의 파군특성과 입사파 및 내부수위간의 상관성을 파악하기 위해 스펙트럼 해석한 결과가 Fig. 17~Fig. 19이다. 본 실험의 모든 내부수위 스펙트럼해석결과 저주파수 영역

에서 높은 에너지밀도 출현을 발견할 수 있었는데 이는 입사파랑이 제체내부로 전파될 때 구조물 내부에서 입사파랑의 단주기 성분은 대체로 소산되는 반면 장주기 성분은 그대로 전달되는 것으로 판단된다.

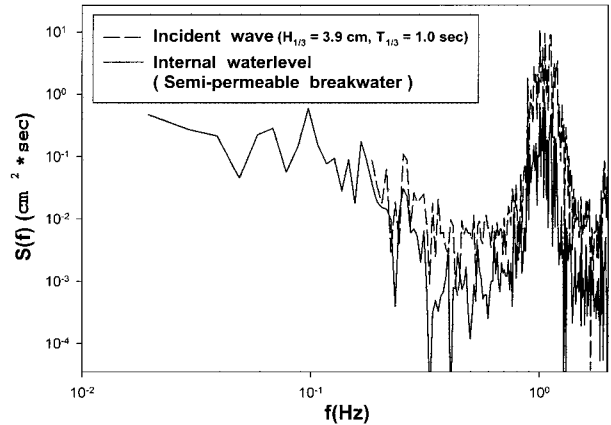


Fig. 17 Spectrum comparison of between incident wave and internal waterlevel (k=7.46 cm/sec)

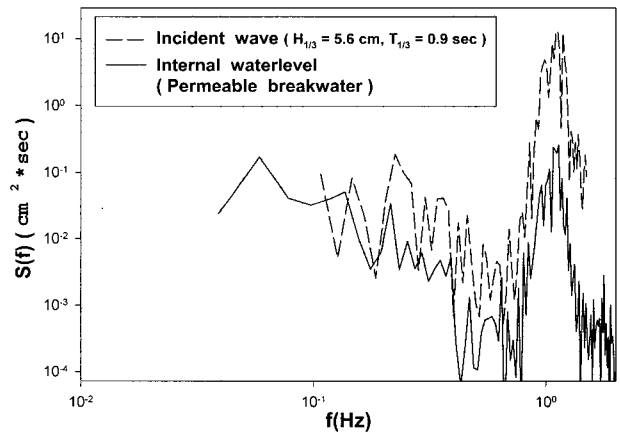


Fig. 18 Spectrum comparison of between incident wave and internal waterlevel (k=7.46 cm/sec)

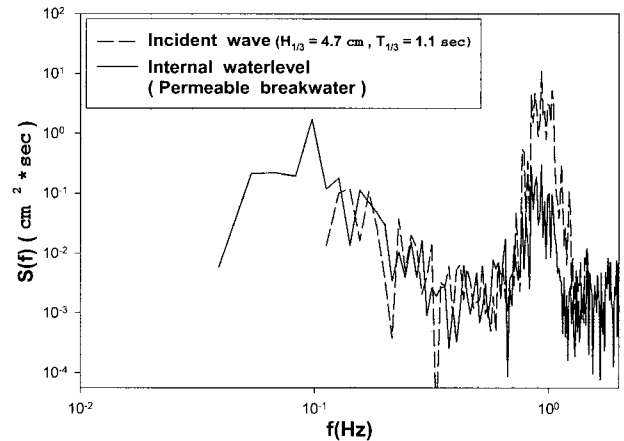


Fig. 19 Spectrum comparison of between incident wave and internal waterlevel (k=1.1 cm/sec)

4.2. 사면상의 수리특성

규칙과 실험과 동일하게 불규칙과 실험에서도 반사율과 소상 파고로서 사면상 수리특성을 파악하였다. Fig. 20와 Fig. 21은 각각 $\xi_{1/3}$ 에 대한 반사율과 상대소상파고($R_{u1/3}/H_{1/3}$)를 나타낸 것이다. 규칙과 실험결과와 전체적으로 유사한 경향을 보이지만 구조물의 투수성에 따라서 차이가 있음을 알 수 있다. $k=7.46$ 인 경우 반사율과 상대소상파고가 $k=1.1$ 인 경우보다 더 낮게 나타나고 있는데 이는 방파제 내부 재료의 공극률에 따라서 사면상의 수리특성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.3. 내부수위 변동특성 해석

Goda(1970)의 파군특성 인자인 파련길이(run-length, $j_{1/3}$)의 개념을 도입하여 불규칙과 실험결과를 해석하여 Fig. 22에 나타내었다. 그림에서 run-length가 클수록 내부수위 상승량도 비례하게 커지는데 이는 입사파가 큰 파군을 가질수록 내부수위 상승 또한 크게 나타남을 의미한다.

또한 입사파 특성에 대한 제체 내부수위 변동특성을 살펴보기 위해 $\xi_{1/3}$ 에 대한 상대내부수위($\eta_p/H_{1/3}$) 변동특성을 Fig. 23에

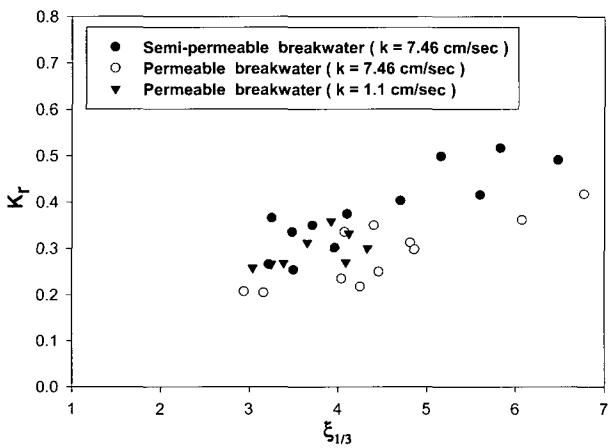


Fig. 20 Reflection coefficient(K_r) versus $\xi_{1/3}$

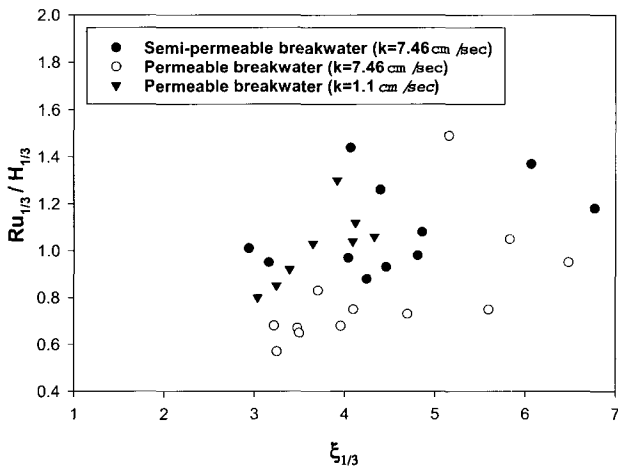


Fig. 21 Run-up ($R_{u1/3}/H_{1/3}$) versus $\xi_{1/3}$

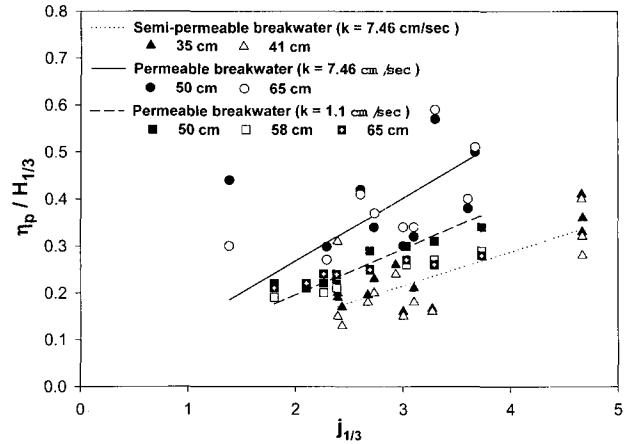


Fig. 22 Relationship of $\eta_p/H_{1/3}$ versus $j_{1/3}$

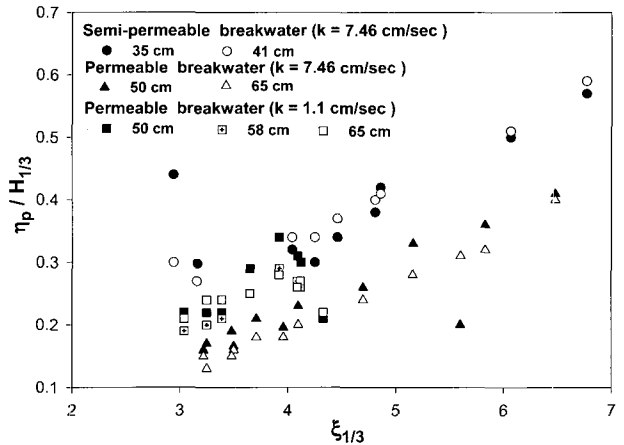


Fig. 23 Relationship of $\eta_p/H_{1/3}$ versus $\xi_{1/3}$

나타내었다. 그림에서 규칙파인 경우 $\xi > 4$ 일 때 일정한 패턴을 나타내던 것이 불규칙파인 경우 $\xi_{1/3}$ 가 증가할수록 상대내부수위도 비례적으로 증가함을 나타내고 있다. 이는 입사파가 가지는 파군의 특성에 따른 것으로 불규칙과 실험인 경우 구조물 내부에서의 고파랑 상호간의 위상간섭에 따른 것을 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 입사파랑에 따른 방파제 내부수위의 변동특성을 투수성이 다른 재료에 대하여 수리모형실험을 수행하고, 내부수위상승이 사면상의 소상파에 미치는 영향 및 내부수위의 변동특성을 입사하는 파랑의 파군 등의 특성과 관련지어 논의함으로써 내부수위의 변동기구를 규명하고자 하였다. 이러한 연구과정에서 얻어진 주요 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 규칙과 실험결과에서 내부수위상승은 입사파랑 에너지의 누적효과로 인해 발생하며, 방파제 내부로 갈수록 내부수위상승량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 ξ 에 대한 내부수위의 관계에서 규칙과 실험결과 $\xi > 4$ 에서 ξ 가 증가할수록 내부

수위는 일정하게 나타난 반면에 불규칙파 실험인 경우 상대내부수위는 비례하게 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 투수성에 따른 상대내부수위는 $\eta_p/H = -0.08(k/U_{\max}) + 0.175$ 의 관계를 가지며 상관계수(γ)는 0.62이고, 상대소상파고와 상대내부수위는 $R_u/H = 1.38 \{1 - \exp(-0.91\eta_p/H)\}$ 의 관계를 가지며 상관계수(γ)는 0.72이다.

3) 불규칙파 실험을 통해 입사파랑의 파군특성이 내부수위에 그대로 전달되며 입사파랑의 수면변동폭이 클수록 내부수위의 변동폭도 크다. 즉, 입사파의 파련길이의 증가에 따라 내부수위도 증가하는 것으로 나타났다.

4) 구조물이 투수성이 큰 재료인 경우에 투수성이 작은 경우보다 상대적으로 반사율과 상대소상파고가 더 낮게 나타났으며, 내부수위 스펙트럼 해석결과 저주파수 영역에서 높은 에너지밀도를 가진 파가 존재하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 전재우 (2000). "투과성 방파제의 내부수위 변동과 방파제의 수리특성", 부경대학교 석사학위논문.
- Ahrens, J.P. and Titue, M.F. (1985). "Wave run-up formulas for smooth slopes", J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol 111, No 1, pp 128-133.
- Battjes, J.A. (1974). "Surf similarity", Proc. 14th Coastal Engineering Conf., ASCE, Vol 1, pp 466-479.
- Bruun, P. (1985). "Design and construction of mounds for breakwaters and coastal problems", Coastal Eng, Vol 1, pp 28-380.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). Water wave mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, World Scientific Press.
- Goda, Y. (1970). "Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation", Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol 9, No 3, pp 3-57.
- Holscher, P., de Groot, M.B. and Van der Meer, J.W. (1988). "Simulation of internal water movement in breakwaters", Modelling Soil-water Structure, pp 427-433.
- 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, M.A. and Gimenez-Curto, L.A. (1981). "Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action", Coastal Eng., pp 187-206.
- 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.
- Ryu, C.R. (1984). "A study on the hydraulic optimal design of the rubble mound breakwaters", Thesis for Doctor of Eng., Osaka Univ.
- Van der Meer, J.W. (1988). "Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers", J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol 114, No 1, pp 537-557.
- 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 6월 3일 최종 수정본 채택