

수중 잠제구조물의 파랑 전달율과 안정성 및 기능성 평가

김용우* · 윤한삼 · 류청로 · 손병규¹
 부경대학교 해양공학과, ¹국립수산과학원

Estimation on the Wave Transmission and Stability/Function Characteristics of the Submerged Rubble-Mound Breakwater

Yong Woo KIM*, Han Sam YOON, Cheong Ro RYU and Byung Kyu SOHN¹
Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
¹*National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902, Korea*

The 2-D hydraulic experimental results for the submerged rubble-mound structure, we have been concerned with the stability/function characteristics of the structures by the effects of wave force, scour/deposition at the toe and the wave transmission ratio at the lee-side sea. So, to investigate the variation characteristics of the wave transmission ratio which depended on a geometrical structure of the submerged breakwater profiles, the critical conditions for the depth of submergence and crest width were obviously presented. In summary, the results lead us to the conclusion that the wave control capabilities of submerged breakwaters by the variation of the submergence depth is higher than about 4 times the degree at the efficiency than the that of crest width. The destruction of the covering block at the crest generated at the region which was located between the maximum and minimum damage curve, and it's maximum damage/failure station from the toe of the structure was $0.2 L_s$. As the wave transmission coefficient and the slope of the structure increase, the damage/failure ratio and the maximum scour depth at the toe was extended, respectively. When the maximum scour depth happened, the destruction of the covering block which was located at the toe generated at the front of the submerged rubble-mound breakwater. Finally, it was found from the results that the optimization of the structure may be obtained by the efficient decision of the submergence depth and crest width in the permissible range of the wave transmission ratio.

Key words: Submerged rubble-mound breakwater, Stability/function characteristics, 2-D wave experiment, Wave transmission characteristic, Damage/failure ratio, Scour/deposition mode

서 론

파랑제어구조물 가운데 수중구조물인 잠제는 외해로부터의 파랑제어기능을 수행할 뿐만 아니라, 자연 그대로의 해역경관유지, 천단상의 유수역을 통한 해수교환을 개선·향상시켜 항만 및 어항 내부해역의 오염방지, 인공어초 역할을 수행함으로써 생태계 및 해양환경 개선 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 이에 반해 천단 상부를 통해 배후면으로 파랑에너지 전달을 허용하기 때문에, 구조물형상과 파랑조건에 따라 천단부 쇄파에 의한 에너지 소산이 발생, 쇄파충격압의 형태로 천단의 피복블록에 전달되어 구조물의 안정성에 영향을 주게 된다. 또한 기존의 직립 또는 경사식 방파제보다 전달율이 크기 때문에 항내정온도 유지가 어렵다는 단점도 가지고 있다.

따라서 잠제의 파랑에너지제어능력의 효율을 향상시키기 위해 제체폭을 넓게 하거나(광폭), 천단고를 정수면 부근에 위치시킴으로써 강제쇄파에 의한 파랑에너지의 소산을 유도하는 방법을 설계에 적용하게 되는데, 이를 위해서는 구조물이 설치되는 현장조건을 고려하여, 외해입사파랑의 조건 및

구조물 설치시 잠제의 천단고와 제체폭, 피복블록의 크기선정 등이 요구되어 진다.

최근 이러한 잠제 구조물과 관련한 연구사례로는 Mndez et al. (2001)이 입사파 특성, 구조물 형상 및 내부 투수성에 의해 발생하는 쇄파와 그로 인해 발생하는 에너지 소산, 물질수송, 평균수면변동 및 radiation stress에 대해서, Rufin et al. (1996)와 Losada et al. (1992)는 피복블록에 작용하는 파력, 파괴된 피복블록의 이동양상을 통해 광폭 잠제의 파괴패턴 및 파괴기구에 대해 논의하였다. Araki et al. (1999)은 파괴된 잠제의 단면이 천단수심이 깊어지거나 제체폭이 넓어지는 효과를 발생시키므로 이에 대한 재평가가 있어야 한다고 제안하였다. 또한 Williams et al. (1996)은 광폭 잠제의 경우 파랑제어 효율이 높으나, 기존 방파제와는 다른 파괴기구에 의해서 피복블록의 안정성에 영향을 주기 때문에, 이에 대한 연구의 필요성을 주장한 바 있다 (Van der Meer et al., 1994; Sumer et al., 2001).

또한 세굴·퇴적의 의한 파괴메카니즘에 관한 연구로 Sumer et al. (2000)이 사석방파제 및 직립방파제를 대상으로 수리실험연구를 수행한 바 있으며, Yoon et al. (2002)은 사석방파제 기초부 (toe)에서의 세굴·퇴적의 일반적인 패턴을 입사파 특

*Corresponding author: lucky104@nate.com

성과 구조물 형태를 포함하는 surf-similarity parameter를 이용해 구분짓고 그 메커니즘이 발생할 수 있는 영역을 정식화하였다.

하지만 상술한 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 수중구조물인 잠제에 대한 피복블럭의 안정성, 구조물 배후면에서의 파랑전달특성, 세굴에 의한 파괴메카니즘 등 복합적인 파괴모드를 밝힌 연구 결과는 미흡한 실정이다. 또한 파랑에너지의 효율적인 제어를 위해서 제체의 폭을 무한정 길게 하거나 천단고를 높일 수 없기 때문에, 경제성 및 시공상의 문제점을 고려하여 제체의 폭과 천단고의 최대한계를 명확히 할 필요성이 있다.

본 연구는 수중구조물인 잠제의 2차원 수리실험을 통해, 잠제에 미치는 파력 및 기초부 세굴에 의한 파괴와 단면파괴로 인한 구조물의 기능성 변화특성을 살펴보고자 한다. 구체적으로 잠제의 천단고 변화에 따른 파력에 의한 피복블럭의 파괴와 기초부 세굴에 의한 지형변동 패턴을 시·공간적으로 논의한다. 또한 구조물의 기하학적 형상에 따른 파랑전달율의 변화특성을 살펴보고, 제체의 폭과 천단수심에 대한 한계를 제시하고자 한다. 이를 통해 잠제의 설계·시공과정에서 요구되는 구조물의 안정성 및 기능성에 대한 종합적인 검토를 통해 잠제 최적설계에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

단면 수리모형실험

수중구조물인 잠제의 안정성 및 기능성 평가를 위해 2차원 단면 수리실험을 수행하였다. 실험에 사용된 수조는 Fig. 1에 서와 같이 길이 35 m, 높이 1.0 m, 폭 1.0 m인 piston형 2차원 조파수조이며, 1:40의 해저경사 위에 실험모형을 설치하였다. 1:1.5의 사면경사를 가지는 잠제구조물 실험모형은 제체 내부 사석, 피복사석과 피복블럭으로 구성되어 있다.

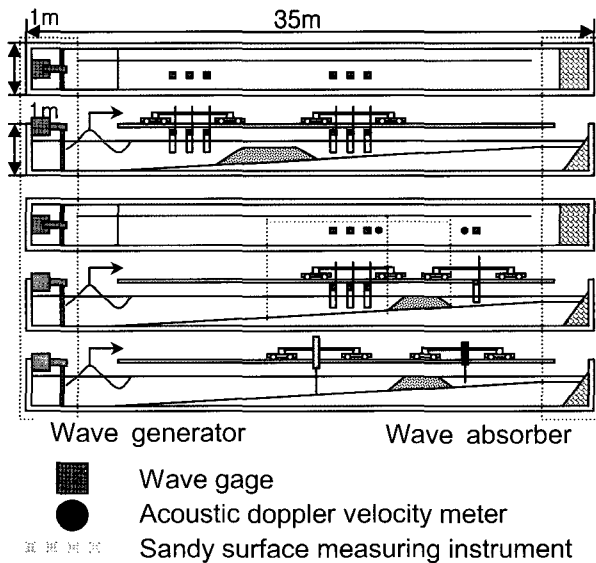


Fig. 1. Layout of the test flume.

실험대상파랑은 우리 나라 연안해역의 해상파랑 특성을 고려하여 (Ryu et al., 1999) 잠제의 수리특성실험시에는 파고 3.5-8.5 m, 주기 7-11 sec인 불규칙파를, 안정성 실험시에서는 파고 3.7-9.4 m, 주기 8-12 sec인 규칙파와 불규칙파를 대상으로 하였으며, 불규칙파는 B-M (Bretschneider-Mitsuyasu) spectrum을 사용하였다. 입사하는 파랑의 계측은 실험모형 전면에 설치된 3대의 용량식 파고계 (Capacitance type wave height meter)로부터 수위변동을 계측, 3점법을 사용하여 입사 분석을 수행하였다. 또한 실험에 사용된 계측기기로는 기초부 세굴을 측정하기 위한 장치로 최대측정오차 ±0.5 mm 인 사면계 (Sandy surface measuring instrument), 구조물 주변의 유속장 계측을 위한 도플러유속계 (Acoustic doppler velocity meter)이다. 구조물 전면의 세굴·퇴적은 기초부에서 2 cm 간격으로 총 65지점에서 측정하였고, 잠제의 단면변형은 잠제의 단면을 12개 영역으로 나누어 실험전후의 단면변화를 목시관측 및 화상해석을 통해 분석하였다.

주요 영향인자 분석

잠제의 안정성과 기능성에 대한 단면 수리실험에 앞서 주요 영향인자를 차원해석을 통해 분석하였다. 잠제의 안정성에 영향을 주는 인자들은 입사파랑의 조건 (H 입사파고; L 입사파장; T 입사파주기; α 파랑입사각), 구조물의 기하학적 특성 (β 사면경사; W_r 사석중량; B 구조물의 폭; k_r 사석의 형상계수; h_r 구조물 전면수심; h_d 천단 수심; A_{sub} 구조물 단면적), 수리현상에 대한 변수 (h_s 기초부 최대세굴깊이; V_{max} 최대수립자속도; D 단면파괴율; K_T 파랑전달계수; N_s 안정계수; KC_{number} 수), 기타 물리적 성질 및 외력환경을 표현하는 변수 (ρ_w, ρ_r 물과 사석의 비중; g 중력가속도; e 공극률; d_{50} 기초부 저면토사의 대표입경; R_e Reynolds number) 등이다.

본 연구에서는 점성향의 영향보다 관성향의 영향이 지배적인 중력식 방파제에 대한 수리실험이므로, Froude 상사법칙을 적용하고 Buckingham π 정리에 따라 차원해석을 수행하였다. 차원해석을 통해 획득되어진 영향인자는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

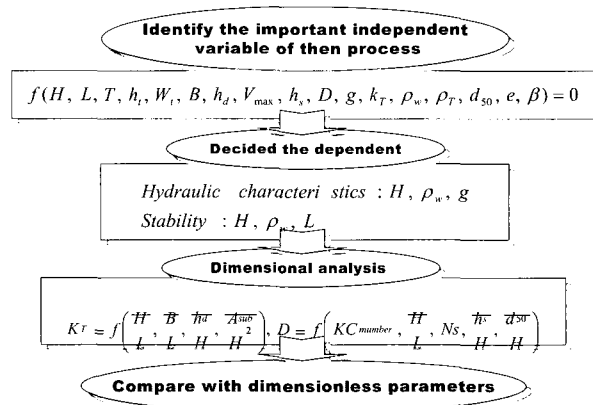


Fig. 2. Flow of dimensional analysis.

실험단면의 설정

잠재의 안정성과 기능성의 두 가지 특성을 살펴보기 위해 Fig. 3과 같이 모형단면을 선정하고, 각기 다른 입사파랑 조건 하에서 파괴 및 세굴이 어떤 변화를 보이면서 발달하는지를 구조물 주변장의 유속분포, 기초부의 세굴깊이, 피복석의 파괴율 및 단면적의 변화를 살펴보았다. 특히, 잠재 구조물의 기능성 평가실험에서는 입사파랑 조건과 구조물의 형상에 따라 구조물의 기능성이 어떤 변화를 보이면서 임계값에 도달하는지를 파랑전달율, 반사율, 에너지 손실의 물리량 등을 통해서 중점적으로 검토하였다.

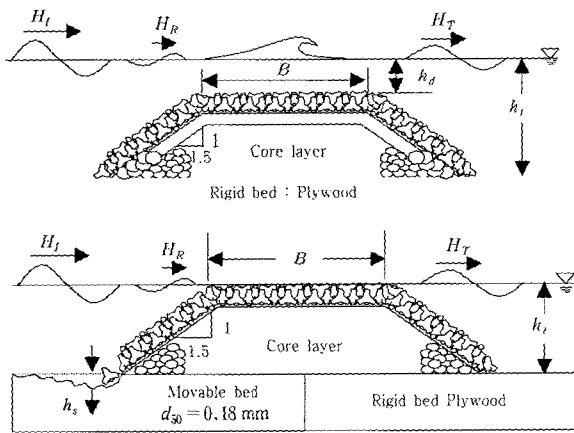


Fig. 3. Definition sketch of cross section.

수리실험시 기능성 평가 모형단면의 경우는 1/50의 축척으로 5가지 잠재단면을, 안정성 평가시에는 1/100의 축척으로 $h_d=0, B/h_i=2$ 인 단면에 대해서 실험을 수행하였는데, 상술한 바와 같이 축척에 차이를 둔 이유는 기초부의 저면모래입경 ($d_{50}=0.18\text{ mm}$)을 고려한 상사이다. Fig. 4는 실험시 사용되었던 모형단면의 실험 사진을 나타낸다.

한편, 사석방파제 내부흐름에 있어 침투류의 축척효과와 발생현계가 $Re_{core} < 2 \times 10^3$ (Ryu, 1984)라는 연구결과를 적용하여, 축척효과가 발생하지 않도록 투수계수 (Sohn et al., 2001)를 유지하였다.

기존의 많은 연구결과에도 불구하고 구조물의 형상 매개변수인 천단수심과 제체폭의 영향을 동시에 나타낼 수 있는 매개변수가 없었기 때문에 기존에는 이를 개별적으로 논의해 왔었다. 하지만 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하여 일정 경사를 가진 잠재의 천단수심과 제체폭의 영향을 동시에 나타낼 수 있는 파라메타인 $A_{sub}/H_{1/3}^2$ (여기서, A_{sub} 는 구조물의 단면적, $H_{1/3}$ 은 입사유의파고)를 제안하는 바이며, 이를 통해서 구조물 형상과 수리특성에 대한 영향을 논의하기로 한다.

피복블록의 파괴패턴

천단에서 쇄파가 발생하는 조건하에서 잠재의 안정성 실험을 수행하였다. 피복블록의 파괴를 세부적으로 관찰하기 위해 잠재를 front slope, crest, back slope의 3구역으로 나누고,

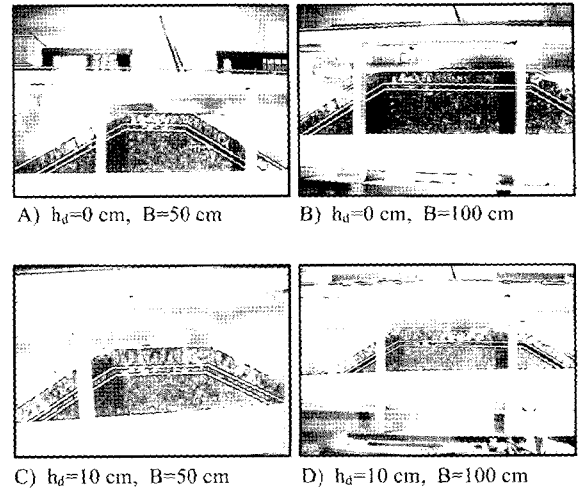


Fig. 4. Cross section of a typical structure.

다시 각 구역을 4개의 소영역으로 구분하여 파괴율 및 단면변형을 관측함으로써, 구조물의 파괴패턴을 파악하고 구간별 안정성에 대해 평가하였다.

구조물 형상과 수리특성

구조물의 형상과 수리특성에 대해서는 Seabrook (1997)가 제안한 경험식 (1)을 바탕으로 구조물의 형상과 전달율과의 관계를 검토하였다. 특히, 이 식은 천단이 정수면에 위치한 경우 ($h_d=0$)에는 제체의 폭과 입사파고만의 함수로써 정도높은 전달율을 계산할 수 있는 장점이 있다.

$$K_T = 0.95 - 0.72 \left[e^{0.65(h_d/H) - 1.09(H/B)} - 0.047 \left(\frac{B h_d}{L D_{1/50}} \right) + 0.067 \left(\frac{h_d H}{B D_{1/50}} \right) \right] \quad (1)$$

안정성 평가의 기준은 안정수와 파괴율과의 상호관계를 통해서 논의하였는데, 여기서, 안정수 (Equivalent stability number, N_s)는 SPM (CERC, 1984)의 다음 식 (2)와 같다.

$$N_s = \frac{\sigma_w^{1/3} H_D(\%) }{(\rho_T/\rho_w - 1) W_a^{1/3}} \quad (2)$$

여기서, W_a 는 피복블록의 중량, H_D 는 $D(\%)$ 파괴시의 파고이다.

일반적으로 잠재의 천단에 위치한 피복블록들이 파괴되면 Back slope 쪽으로 이동하게 되어 사면에 쌓이게 된다. 이것은 천단의 수심이 감소하고 제체의 폭이 증가하는 효과와 같기 때문에 전달율의 정확한 계측이 실시간으로 가능하면 전달율의 변화를 이용하여 단면의 변형과 파괴율을 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 잠재에서 파랑 전달율과 단면 파괴율과의 상호관계를 다음 식 (3)과 같이 설정하여 검토하였다.

$$D(\%) = a \cdot e^{b_1 \cdot (N_s)} = a \cdot e^{b_1 \cdot (K_T \cot^{1/3} \Delta^{-1})} = a \cdot e^{(b_2 \cdot e^{b_1 W_a} + b_1)} \quad (3)$$

여기서, N_{K_T} 는 전달율을 포함한 안정수이며, a 와 b_n 은 실험 조건에 의해서 결정되는 계수로서 본 안정성 실험에 사용된 계수 a , b_1 은 Table 1과 같다.

Table 1. Variation of constant under the condition of min/max damage

Coefficients	Irregular wave		Regular wave	
	Max D (%)	Min D (%)	Max D (%)	Min D (%)
a	0.2902	0.2163	4.6365	1.4212
b_1	14.2668	12.2720	4.3993	3.1204

잠제전면에서의 세굴패턴

본 연구는 실험을 통해 일반적인 사석경사제와 잠제의 구조물 전면 세굴패턴을 검토하고, 그 발생메카니즘에 대해서 논의하며, 실험대상파랑은 규칙파와 불규칙파로 구분하였고, 입사파랑의 특성과 기초부 (toe)의 저면 수심에 따른 세굴의 공간적 분포특성에 대해서 살펴보았다. 그리고 세굴 발생시 구조물의 피복블럭의 거동특성에 대해서 관찰하며, 파랑의 반사를 및 전달율과 최대세굴깊이와의 상호관계를 고찰하고자 한다.

먼저 본 연구에서는 세굴에 영향을 주는 외력인자를 파랑에 의한 경우로 한정하고, 잠제의 기초부(toe)에서 구조물전면의 법선 방향으로 2 cm 간격으로 65 지점에서 세굴깊이를 계측하였다. 특히, 구조물 전면에서의 세굴과 퇴적은 sand ripple과 함께 발생하기 때문에 충분히 안정조건에 도달한 조파시간후 (3000파를 조파한 후)의 사면변화를 계측하고 계측된 값 중에서 최대편차를 추출하여 최대세굴심으로 산정하였다 (Yoon et al., 2002).

Fig. 5는 구조물 전면에 불규칙파랑이 입사할 시, 조파시간에 따른 기초부 세굴변동 및 사면의 피복블럭이 파괴되는 모습을 나타낸 사진이다. 기초부 세굴로 기초부 단면의 피복블럭이 아래로 밀려나가 전체 구조물의 파괴를 일으키는 것을 관측할 수 있었다.

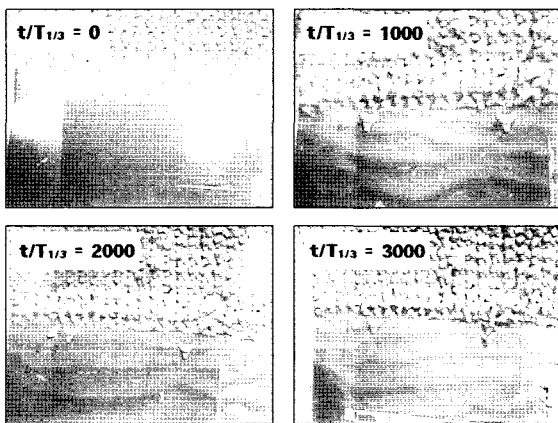


Fig. 5. Photograph of the scour at the toe.

결과 및 고찰

구조물 형상과 수리특성

천단수심과 제체폭에 대한 잠제구조물의 특성을 살펴보기 위해 Fig. 6과 같이 $A_{sub}/H^2_{1/3}$ 에 대한 전달율 (K_T)의 변화를 나타내었다. 그림에서 입사파고 커질수록 전달율의 변화폭이 커지는 것으로 나타나, 구조물의 형상에 의한 파랑제어능력이 감소한다는 것을 알 수 있다. 즉, 파형경사 $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.044$, 제체폭의 파라메타 $B/L_{1/3}$ 가 각각 0.2, 0.4, 0.6이고, 천단수심의 파라메타 $h_d/H_{1/3}$ 가 0.91에서 0으로 감소하면, 구조물 형상 파라메타 $A_{sub}/H^2_{1/3}$ 는 42, 37, 34% 증가하고, 파랑 전달율은 41, 46, 47% 감소한다. 또, $h_d/H_{1/3}$ 가 0, 0.91로 일정하고 $B/L_{1/3}$ 가 각각 0.2, 0.6일 때, $A_{sub}/H^2_{1/3}$ 는 각각 91, 80% 증가하고, 전달율은 각각 17, 26% 감소한다. 또한 천단수심 및 제체폭 변화에 의한 전달율의 최대변화를 살펴보면, 천단수심 변화로 $A_{sub}/H^2_{1/3}$ 가 34% 증가할 때, 전달율은 47% 감소하며, 제체폭 변화로 $A_{sub}/H^2_{1/3}$ 가 80% 증가할 때, 전달율은 26% 감소한다.

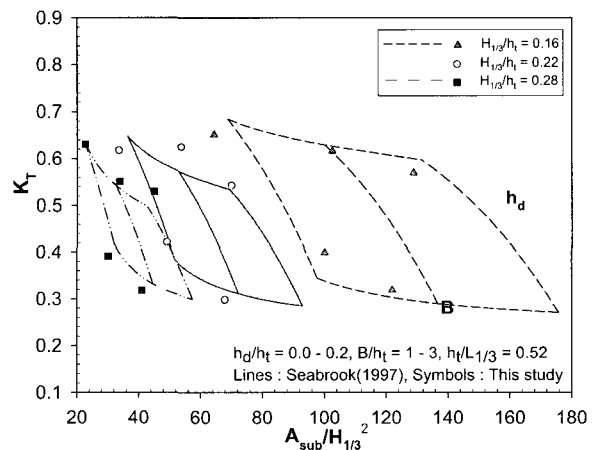


Fig. 6. Influence of crest width and submergence on the wave transmission as the parameter for wave height.

Fig. 7은 입사파장에 대해서 천단수심과 제체폭의 영향을 나타내고 있다. 파고가 같을 때, 파장이 길어지면 (입사파 주기가 커짐) 천단수심과 제체폭의 효과가 증가함을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해 본 실험연구에서는 천단수심에 의한 파랑제어능력이 제체폭보다 약 4배 정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 잠제구조물 설계시, 입사파랑에 따라서 천단수심과 제체폭을 결정해야 할 경우, 허용 전달율 내에서 천단수심과 제체폭의 변화를 통해서 최적의 단면결정이 가능함을 알 수 있다.

피복블럭의 파괴패턴

실험과정에서 피복블럭의 파괴패턴을 살펴보면 초기 입사파랑 입사시 파력작용으로 피복블럭들 사이에 inter-rocking 발생으로 인해 피복블럭의 파괴 및 활동이 일어나지만, 점진

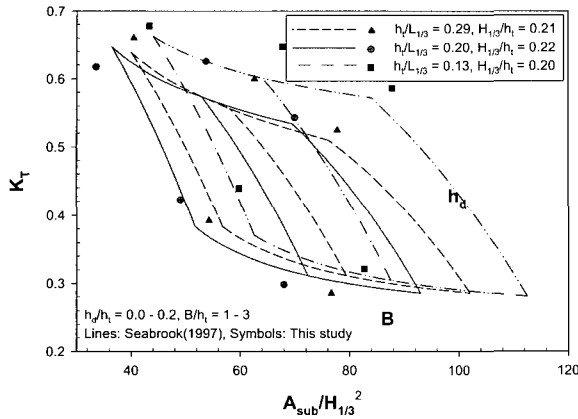


Fig. 7. Influence of sectional area on the wave transmission as the parameter for wave length.

적으로 퇴적되는 단면은 안정화되는 과정을 겪는다. 파괴는 주로 천단에서 발생하였으며, 파괴가 최대가 되는 지점은 제체의 기초부 (toe)에서 파장의 0.2배 떨어진 곳으로 쇄파에 의한 충격쇄파압에 의한 것으로 판단된다. 즉, 피복블록의 파괴율은 최대파고의 크기와 파장에 의해 변화를 보이며, x/L , $x/L_{1/3}$ 가 0.2에서 최대 파괴가 발생하였다 (Fig. 8).

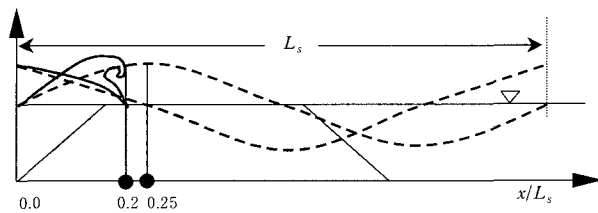


Fig. 8. Definition sketch of maximum damage/failure station.

각 구역별 파괴패턴을 살펴보면 입사파장이 길어지면 Back slope와 Backcrest 부분의 파괴가 증가하고, 파고가 증가하면 Front slope, Frontcrest의 파괴가 증가하는 것으로 나타났다. 천단에서 파괴된 피복블록은 Back slope에 쌓이게 되는데, 이는 수리특성의 측면에서 천단수심이 깊어지고 제체폭을 넓힌 것과 같은 효과이다.

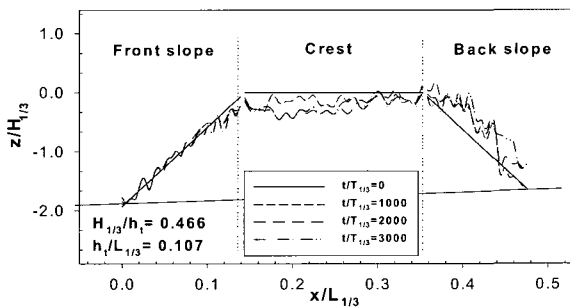


Fig. 9. Variation of the submerged breakwater profiles with the increase in the number of incident waves.

Fig. 9는 시간변화에 따른 구조물 피복블록의 파괴 단면변화를 사면계로 계측한 것이다. 파수에 대한 단면의 변화는 2000파 이상부터 조금씩 안정화 단계에 들어갔으며, Crest 구역에서는 구간 전체에서 파괴가 발생하여 2000파 이상에서는 내부사석이 파괴되는 영역도 관측되었다.

Fig. 10은 식 (2)에 의해서 구해진 안정수와 파괴율과의 관계를 나타낸 것으로 안정수가 4 이상의 값에서 파괴가 급격히 증가하며, 가장 위험한 단면은 파괴율의 증가율이 가장 큰 영역이며, 파괴율의 증가 순서는 Frontcrest, Backcrest, Front slope, Back slope 순이었다.

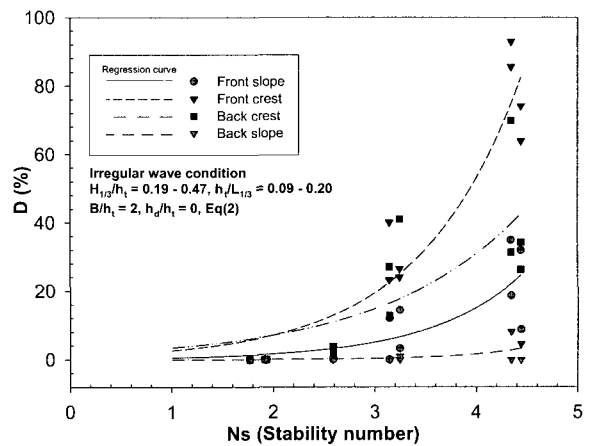


Fig. 10. Relationship between stability number and damage rate.

Fig. 11은 천단에서의 최대·최소 파괴율 (D)과 안정수 (N_{K_T})와의 상호관계를 나타낸 것으로 천단에서 발생하는 피복블록의 파괴는 최대 파괴율 곡선과 최소 파괴율 곡선 사이에 위치하며, 최대 파괴율은 제체의 기초부 (toe)에서 $0.2L_s$ 떨어진 지점에서 발생하였다. 투과율이 증가할수록 파괴율이 커지는데 특히, 투과율이 0.17보다 큰 경우에는 급격히 파괴율이 증가하였다.

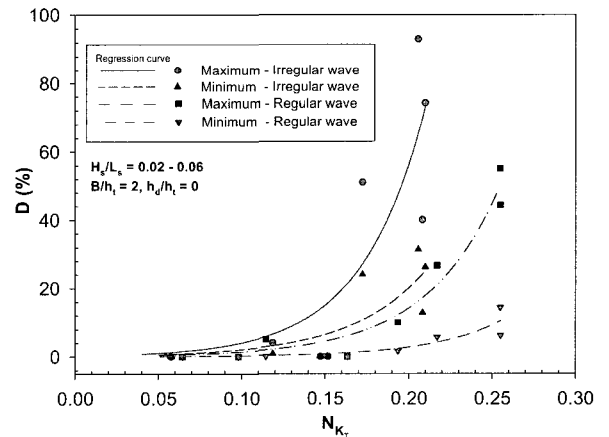


Fig. 11. Variation of the maximum and minimum damage curves.

이상의 결과를 통해 안정수를 포함한 파괴율과 전달율 또는 구조물형상 (단면 변화)과 전달율의 상호관계를 통해 전달율의 측정만으로 수중 잠제구조물에 대한 파괴 정도와 단면의 변형과정도 예측할 수가 있을 것으로 생각된다.

잠제전면에서의 세굴패턴

잠제와 사석경사제의 세굴패턴을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 제체에서 정수면과 접하는 곳을 x 축의 기준으로 할 때, 입사파장에 대한 위치 (x/L_s)가 0.125-0.250 x/L_s 되는 위치에서 세굴경향에서 퇴적경향으로 변하는 것을 알 수 있다.

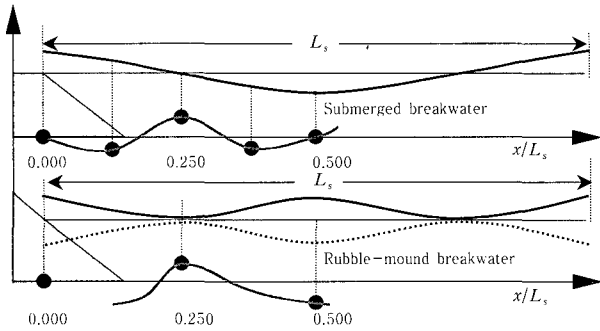


Fig. 12. Definition sketch of scour pattern of Submerged breakwater (Upper) and rubble mound structure (lower).

Fig. 13은 입사파랑이 (a)규칙파와 (b)불규칙파랑인 경우에 대한 잠제 전면에서의 세굴패턴을 나타내고 있다. 입사파고와 주기에 따라서 피복블럭의 파괴 및 활동 (특히 rolling)으로 사면의 경사가 달라지고, 경사가 급해질수록, 구조물 전면 기초부의 수심이 작은 경우에 최대세굴깊이가 커지는 양상을 나타내었다. 또한 최대세굴깊이가 발생하는 실험인 경우에는 기초부 세굴에 의해서 Front slope의 피복블럭들이 파괴되는 것이 확인되었다.

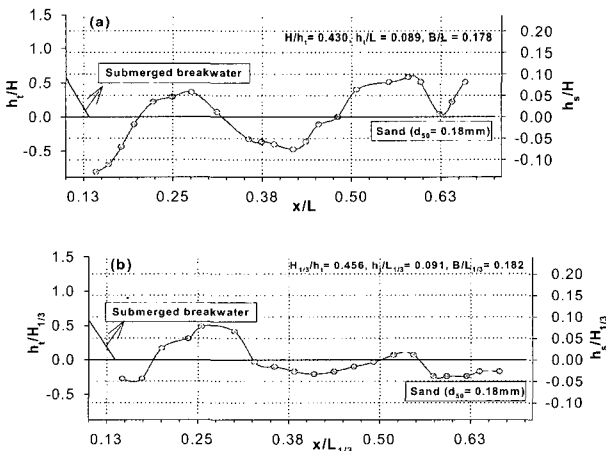


Fig. 13. Variation of the maximum scouring depth after 3000 waves. Cases of (a) regular wave experiment and (b) irregular wave experiment condition.

구조물 조건이 동일한 상황에서 입사파고 (H_i)에 대한 최대세굴깊이와 반사율 및 전달율과의 상호관계를 살펴보기 위해 Fig. 14와 같이 반사율 및 전달율과 최대세굴깊이와의 관계를 나타내었다. 그림으로부터 최대세굴깊이 ($h_{s,max}/H_i$)가 0.08 이상에서는 제체의 toe에서 기초부 세굴에 의한 사면의 파괴가 발생하며, 이 때 반사율이 0.22이고 전달율이 0.48이었다.

이러한 잠제의 기초부 피복블럭의 파괴를 일으키는 세굴을 방지하기 위해서는 기초부 세굴깊이를 감소시키기 위한 대책이 요구되어진다. 따라서 잠제의 천단수심을 증가시키거나 사면의 기울기를 완만하게 유지하는 설계, 저면 보호공법 및 세굴 방지공법 등의 적용이 필요할 것으로 생각된다.

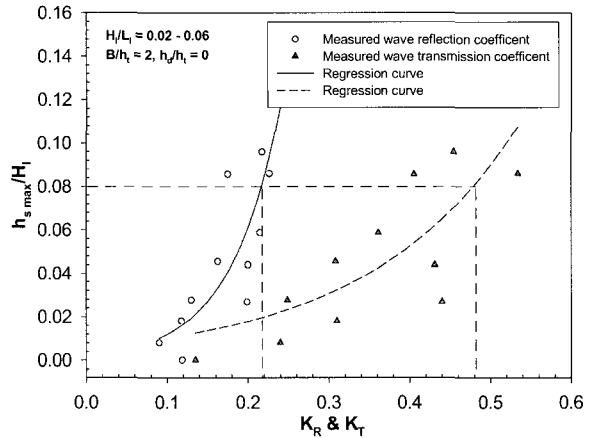


Fig. 14. Influence of wave reflection and transmission on the maximum scouring depth.

참 고 문 헌

Araki, S., Y. Fujiwara and E. Deguchi. 1999. Experiental study on deformation and hydraulic function of rubble mound breakwater. Proc. Ninth ISOPE Conf., 735-742.

CERC (Coastal Engineering Research Center). 1984. Shore protection manual (SPM). Department of the USA Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. 7, 202-212.

Losada, M.A., N. Kobayashi and F.L. Martin. 1992. Armor stability on submerged breakwaters. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 207-219.

Mndez, F.J., I.J. Losada and M.A. Losada. 2001. Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 7-15.

Rufin, Jr T.M., N. Mizutani and K. Iwata. 1996. Estimation method of stable weight of spherical armor unit of submerged wide-crown breakwater. Coastal Eng., 28, 183-228.

- Ryu, C.R. and B.K. Sohn. 1999. Stability criteria of rubble mound structures under the irregular sea conditions. Proc. Int'l Conf. Coastal Structures '99, ASCE, 223-230.
- Seabrook, S.R. 1997. Investigation of the performance of submerged rubblemound breakwaters. MS. Thesis, Queen's Univ., Ontario, Canada, pp. 200.
- Sohn, B.K., H.J. Kim and C.R. Ryu. 2001. An experimental study on the stability of breakwater head by the wave directional effects. J. Kor. Fish. Soc., 34(6), 713-719. (in Korean)
- Sumer, B.M. and J. Fredsøe. 2000. Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater. Coastal Eng., 40, 59-87.
- Sumer, B.M., R.J.S. Whitehouse and A. Tørum. 2001. Scour around coastal structures: A summary of recently research. Coastal Eng., 44, 153-190.
- Van der Meer, J.W. and I.F.R. Daemen. 1994. Stability and wave transmission at low-crested rubblemound structures. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE. 120, 1-19.
- Williams, A.N. and W.G. McDougal. 1996. A dynamic submerged breakwater. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 288-296.
- Yoon, H.S., I.S. Nam. and C.R. Ryu. 2002. Scouring characteristics at the toe of the rubble mound breakwater. J. Ocean Eng. and Technol., 16(4), 7-12. (in Korean)

2003년 7월 29일 접수
2003년 10월 21일 수리