

사석방파제의 안정성에 미치는 방향성효과에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Stability of Rubble Mound Structures by Wave Directionality

손병규* · 류청로*

Byung Kyu Sohn* and Cheong Ro Ryu*

요 旨 : 파랑에 관계하는 현상에는 월파, 표사이동, 구조물의 진동·동요, 파괴 등 방향성의 영향을 현저하게 받아들이는 것이 많다. 이들은 비선형성이 강하기 때문에 수치계산에 의한 해석이 곤란하므로, 수리모형실험으로 외력인자를 평가, 해석정도를 높일 필요성이 증대하고 있다. 본 연구는 파랑의 다양한 입사각에 따라 사석방파제의 안정성을 논의하였으며, 파괴율은 방향성규칙파에서 30°, 방향성불규칙파인 경우는 40° 부근에서 입사각 0°일 때 보다 상대적으로 크게 변동하였다. 즉, 사석방파제의 안정성에 미치는 방향성효과에 따른 것이라고 평가할 수 있다. 이들은 1/10 최대 합성유속의 방향별 빈도분포의 피크가 20°~40°에서 발생하는 사실과 부합된다.

핵심용어 : 사석방파제, 방향성효과, 안정성, 수리모형실험

Abstract □ Phenomena induced by waves, such as overtopping, sediment transport, vibration/fluctuation and destruction of structures are highly influenced by the directionality of wave propagation. These phenomena are often dominated by non-linearity, and so hydraulic model experiments are widely adopted for stability analysis rather than numerical modeling. Thus, stability of rubble mound breakwaters(RMB) due to wave directionality was experimentally investigated in this study. The incident wave angle 30° was found more risky on the damage rate of RMB under directional regular waves, and the incident wave angle 40° was found relatively risky under directional irregular waves. These results clarified the wave directionality effect on the stability of RMB. These facts were found correspondent to the occurrence of the peak between 20°~40° with the directional frequency distribution of 1/10 maximum water particle velocity.

Keywords : rubble mound breakwater, directional effect, stability, hydraulic experiment

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 연안역은 태풍, 파랑, 고조, 해일 등 해안·해양으로부터의 끊임없는 위협에 항상 노출되어, 이로 인한 재해를 방지하기 위하여 연안역 개발의 시점부터 방파제시설의 건설이 수반되어 왔다.

다양한 연안역 방파제시설중에서 방파제는 입사파랑을 제어하여 항만이나 배후지역의 기능을 유지시킬 목적으로 건설된 가장 기본적이고 중요한 연안시설물중의 하나이다.

사석방파제는 그 구성요소인 사석이나 피복블럭(TTP)의 설계에 주요한 외력인 파랑에 의해 파괴되어 방파제로서의 기능을 잃는 경우가 더러 있지만, 현행의 설계법에서는 사석이나 피복블럭이 이동하면 방파제로서의 기능이 유지되어도 파괴로 볼 수 있다. 그러나 방파제는 적당한 시기에 유지·보수가 이루어지기 때문에, 방파제 사면상의 피복사석이나 피복블럭의 파괴가 발생하더라도 방파제의 본래의 기능을 완전히 상실하는 경우는 없다(荒木 등, 1997). Goda(1985)는 입사각(θ) 15° 이내의 파랑은 직각 입사하는 파랑($\theta=0^\circ$)으로 간주하여 방파제 설계지침을 제시하였다. 그렇지만, 파랑의 입사각

*부경대학교 해양공학과(Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

의 영향으로 인하여 피복블럭의 개체형태에 따라 사석 블럭의 사면의 안정은 경사 입사파의 경우는 직각 입사파보다 위험하지 않지만, TTP로 피복된 사면은 경사 입사파의 경우가 직각 입사파보다 위험하다고 알려져 있다(Losada, 1982).

특히 실지형모델을 이용한 사석호안의 파괴모드중에 주로 법선 기초부의 세굴에 의한 파괴와 사면상의 파와 구조물의 상호작용에 의한 파력의 직접작용에 의한 파괴가 논의되어왔다(柳 등, 1999; Ryu and Sohn, 1999). 이들 결과는 피해사례와 특수한 조건에서의 파괴모드별로 전형적인 한계를 구한 것이지만, TTP로 피복된 사석방파제의 안정성은 입사파의 방향성을 고려하지 않으면 안될 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 다방향불규칙파 조파장치를 이용하여 파랑의 입사각에 따른 사석방파제의 안정성을 명확히 하고자 한다.

2. 조파장치 및 조파특성

2.1 조파수조 및 조파장치의 개요

본 대학교 해양수리실험소에 설치된 조파수조는 길이 25 m, 폭 10 m로 최대수심은 0.8 m까지 가능하며, 수조 내에 10대의 paddle이 하나의 시스템으로 작동되는 serpent형 조파기로 구성되어 있다. 조파장치 배후의 교란이나 반사파에 의해 조파기전면의 실험영역에 전파하지 않도록 수조내의 각 측벽은 사석(반사율 0.2이하)으로 소파공의 효과를 만족하도록 1:3의 경사로 설치하였다.

본 조파장치는 serpent형 조파기를 제어하기 위해 1대의 컴퓨터장치와 계측을 위한 컴퓨터 1대, serpent형 조파기의 본체로 이루어져 있다. Serpent형 조파장치를 제어하는 컴퓨터는 조파판의 변위를 제어하도록 되어 있다. Table 1은 조파기의 주요제원, Photo 1은 조파기의 외관을 나타낸 것이다.

Serpent형 조파장치는 다수의 폭이 좁은 피스톤 혹은 플랩형의 조파기를 가로로 일렬로 나란히 한 것이고, 기본적으로는 각 조파판의 운전위상을 달리하여 파향이 조파판열에 대해서 어느 각도를 가지는 주기, 파고가 일정한 경사파를 조파되도록 설계된 것이다(Takayama, 1982).

2.2 발생파의 특성과 목표스펙트럼의 재현성

상술한 조파수조에 Fig. 1과 같이 구성하여 발생파의

Table 1. The principal factor of wave-maker system

Terms	Serpent-type wave-maker
Number of paddle	10 ea.
Width of wave-maker board	7 m (0.7 m×10 ea.)
Motor	Hydraulic servo motor (1.3 kW/ea)
Max. wave height	0.3 m at water depth 0.8 m
Effective max. stroke	±30 cm (piston type)
Mobile velocity of max. wave-maker board	60 cm/sec



Photo 1. Serpent-type wave-maker appearance.

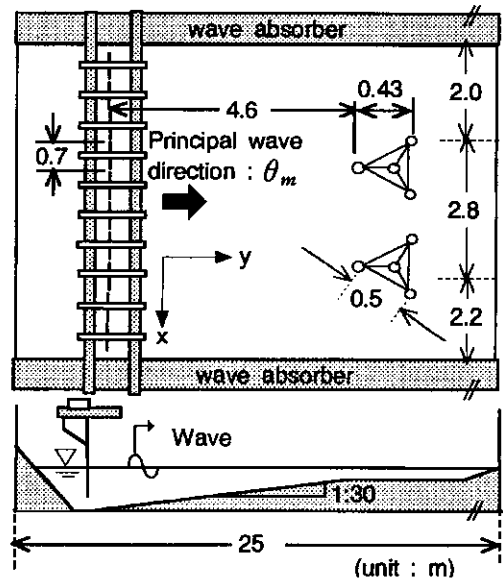


Fig. 1. General description of experimental conditions.

특성 및 각 측정에서 파고분포를 검토하였다. 각 실험 케이스에 있어서 심해측 조파장치 전면으로부터 2.5 m 떨어진 지점으로부터 0.5 m 간격으로 6측선($y = 2.5$ m,

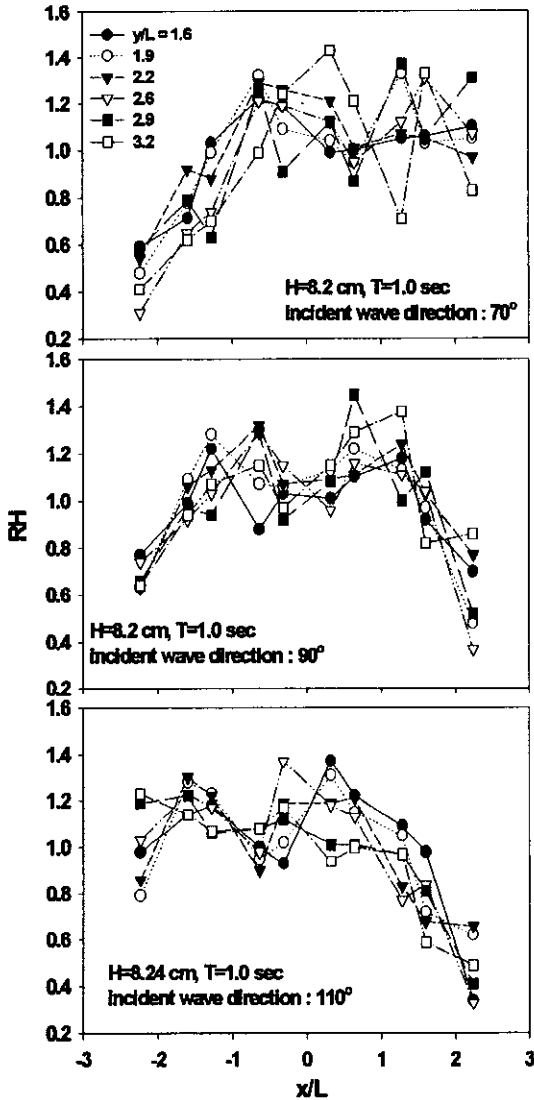


Fig. 2. Wave height ratio distribution in the wave-maker basin.

3.0 m, 3.5 m, 4.0 m, 4.5 m, 5.0 m)상의 연안방향의 파고비분포를 조사하였다. Fig. 2는 Biesel limit에 의해 양측면은 소파장치를 구성한 Fig. 1과 같이 각 지점에서의 연안방향 파고비분포를 나타낸 것이다. 이 그림은 조파파향 70°, 90°, 110°의 대표적인 케이스에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 파고비(RH)는 다음 식과 같이 각 계측점에서 얻어진 파고를 각 계측선의 평균파고(10측점의 평균파고)로 나눈 값이다.

$$RH = H_i / \left(1/10 \times \sum_{i=1}^{10} H_i \right) \quad (1)$$

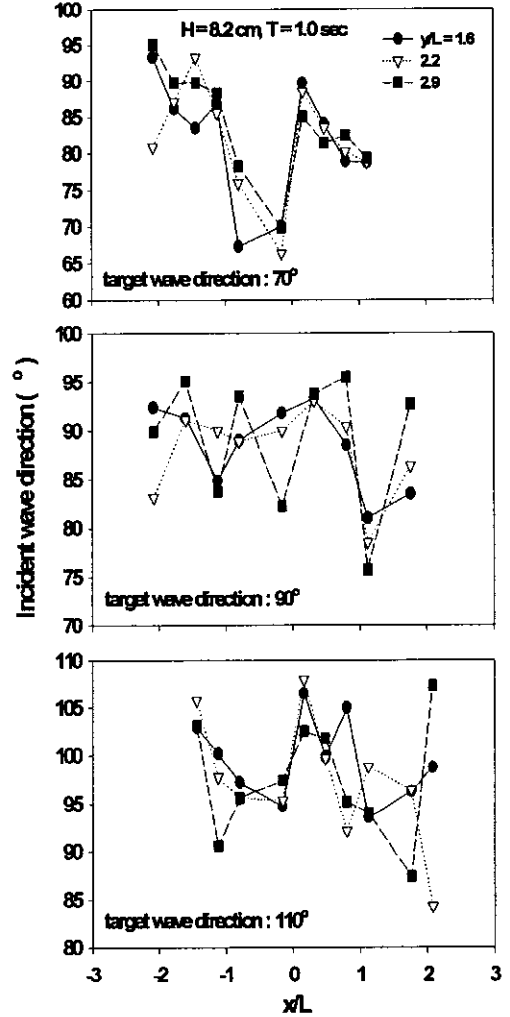


Fig. 3. Wave direction distribution in the wave-maker basin.

여기서, 첨자 i 는 각 계측선상의 측점의 번호이다. 따라서 각 계측선의 분포의 값이 다르다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 파고비분포는 파향에 따라 서로 다른 형태를 나타내고 있으며, 조파기능영역은 파장에 대한 연안방향(= x/L)이 -1부터 1까지가 비교적 안정된 영역인 것을 확인할 수 있다.

파고비 분포와 동일한 방법으로 Fig. 3과 같이 연안방향(x 축)의 파향분포를 목표파향별로 나타내었다. 파향은 우선 각 계측점의 시계열 수면 변동량으로부터 zero-up-cross 점의 시간을 구하고 인접하는 2계측점에서 동일한 파의 위상차 τ 를 산정하였다. 이들에 의해 개개의 파향을 다음 식으로 산정하고, 측정시간중에 계측한 파의 수로 평균한 값을 2계측점의 중간점에서의 조파파향

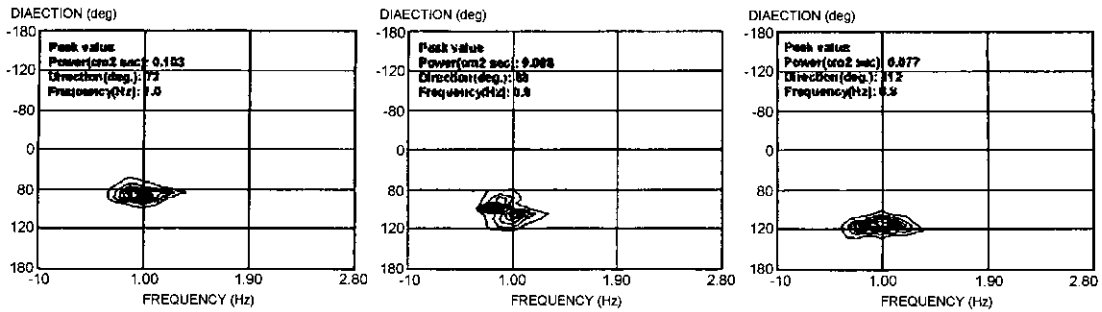


Fig. 4. The distribution of directional spectrum under the directional waves.

θ_m 으로서 산정하였다.

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(-\frac{\tau \cdot L}{T \cdot D}\right) \quad (2)$$

여기서 T 는 진행파의 주기, L 은 T 와 수심 h 로부터 구해지는 파장, D 는 x 축방향의 계측점간의 간격이다. Fig. 4는 Fig. 1과 같이 파고계를 star array로 구성하여 구조물 설치지점에서의 방향스펙트럼의 일례를 나타낸 것으로 파향과 피크주파수의 재현성이 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 2~Fig. 4의 발생파의 특성으로부터 구조물을 설치할 지점을 선택할 수 있다고 판단된다.

3. 평면수리모형실험

3.1 Core층의 투수계수 측정

항만구조물의 계획 및 설계에 있어서는 수리모형실험에 의해 결정할 수 밖에 없는 사항이 적지 않다. 본 연구에서는 축척효과가 발생하지 않도록 투수계수를 일정하게 유지하기 위하여 core층의 투수성에 대해서 검토하였다.

투수실험은 투수계수가 큰 조립토에 적합한 정수두 투수실험을 수행하였으며, 투수실험 조건은 Table 2에 나

Table 2. Results and condition of permeability test

Grain size (cm; d_{50})	Density (g/cm^3)	Porosity (%)	Permeability (cm/sec)
0.15	2.58	44	1.1
0.7	3.00	45.83	6
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	12.53
2.95	2.93	45.80	14.52

타낸 것과 같다. 본 실험에 사용된 투수계는 재료용기의 길이 $L = 80$ cm, 수두차는 110 cm로 하였고, 재료는 평균 입경이 다른 7종류의 시료를 사용하였다. 본 투수 실험에 사용된 재료의 공극률은 43~46%로 편차가 5% 이내의 공극률을 가지는 사석을 사용하였으며, 7종류의 재료에 대하여 수두를 일정하게 유지하면서 10회 반복하여 측정하였다.

투수계수의 결정은 Darcy의 법칙을 적용하여 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$Q = A \cdot k \cdot i \cdot t = A \left(\frac{k}{L} \right) t \quad (3)$$

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (4)$$

여기서, Q : 단위시간당 유량, A : 시료의 단면적, L : 시료의 길이, h : 수두차, t : 측정시간을 각각 나타낸다.

투수실험결과 식 (4)와 같은 방법으로 각각의 직경에 해당하는 재료들의 투수계수를 Fig. 5와 같이 나타내었다.

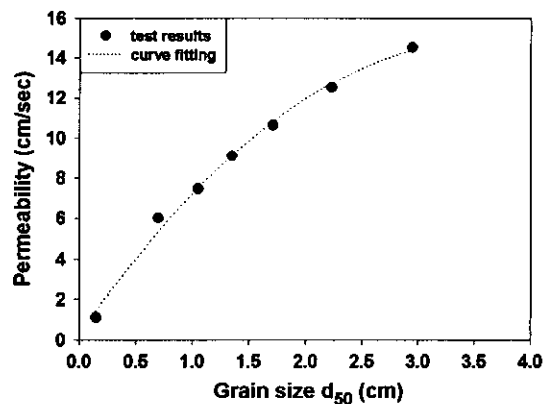


Fig. 5. Permeability as representative diameter.

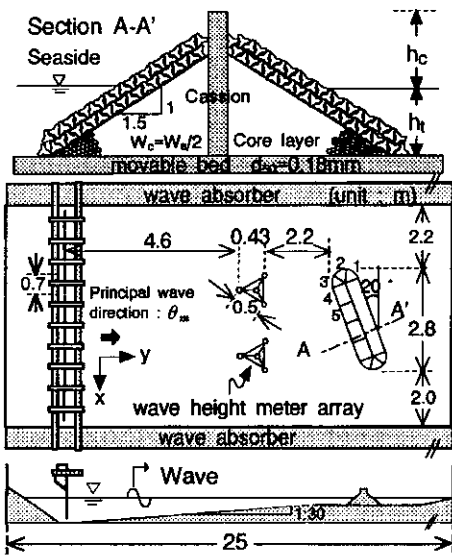


Fig. 6. Experimental apparatus of multi-directional irregular basin.

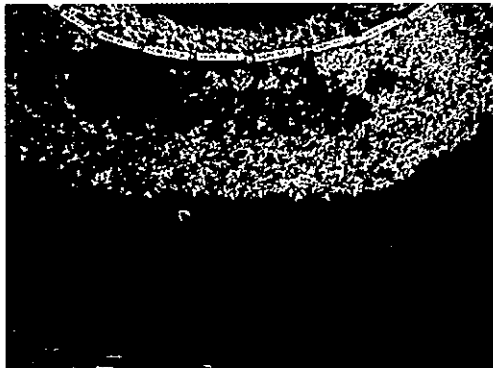


Photo 2. An example of destroyed TTP due to higher waves.

3.2 실험방법 및 내용

전술한 수조내의 유효조파영역, 발생파의 특성 및 목

표스펙트럼의 재현성의 평가로부터 Fig. 6과 같이 모형 구조물을 설치하였다. 모형방파제가 조파판과 20° 기울 어지게 제작한 것은 수조내에 발생하는 다중반사의 영향을 고려한 것이다.

입사파는 규칙파와 불규칙파로서 Table 3과 같이 사면경사는 1:1.5로 고정하여 각 주기에 해당되는 파고를 서서히 증대시켜 TTP 사면상에서 쇄파가 발생하기까지 또는 사면상의 TTP가 불안정하게 되어 Photo 2와 같이 내부 사석층이 드러나 평형단면이 일어나는 경우를 대상으로 하였다.

방파제 사면상의 수립자속도의 측정은 3방향의 유속을 측정할 수 있는 도플러유속계(Doppler velocity meter, ADV lab, NORTEK)를 이용하였으며, 각 실험case는 20분(현지시간 약 3시간)간 파파의 공간적인 이동분포상황을 목시관측, 비데오촬영, 사진촬영으로 파파율에 미치는 오차를 최소화하였다.

본 연구에서는 모두 이동상실험을 수행하였으며, 중앙 입경 $d_{50} = 0.18$ mm의 모래를 이용하였다.

이와 같이 기본적으로 반복실험을 수행하여 실험에 의한 오차를 최소화하였으며, 300 case의 실험을 수행하였다.

3.3 파파의 정의 및 파파율의 산정

해안구조물의 안전성을 논의할 때 일반적으로는 안전율을 가지고 안전성이 논의된다. 柳(1984) 등이 이미 지적한 바와 같이 이 안전율을 규정하는 경우 가장 문제가 되는 것은 피해한계 혹은 파파 및 파파율의 정의이다. 사석방파제의 경우, 피복석 또는 피복블럭이 일부 이동하여도 방파제 자체의 기능이 유지되는 경우, 이것을 파파라고 판단하는가가 극히 어려운 문제이다.

따라서 파파율에 대해서는 임의영역 S.W.L.±H의 폭을 가지는 영역으로 한정하여 식 (5)와 같이 파파율을

Table 3. The experimental conditions of breakwater models to analyze the stability and the wave control functions

Terms	W_a	W_c	Slope(α)	h_i (cm)	wave type	Spectrum type	Remarks
Scale (1:100)	20 g	5~10 g	1:1.5	11.0~19.0	Regular, Irregular	Bretschneider-Mitsuyasu	Nonoverlapping Bottom slope (i) = 1:30
	20 g, only build a TTP(2 layers)						
$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)		$h/L_{1/3}$	$H_{1/3}/L_{1/3}$		$L_{1/3}$ (cm)	θ_m
0.7-1.5	2.0~5.0		0.1~0.2	0.01~0.04		60.8~147.4	70° 90° 110°

Notes; W_a , W_c are the weight of armour unit of revetment, core layer respectively, h_i is the water depth at the toe of the breakwater, T is the period of incident wave and H is the incident wave height.

All models are scaled with Froude criterion of similitude.

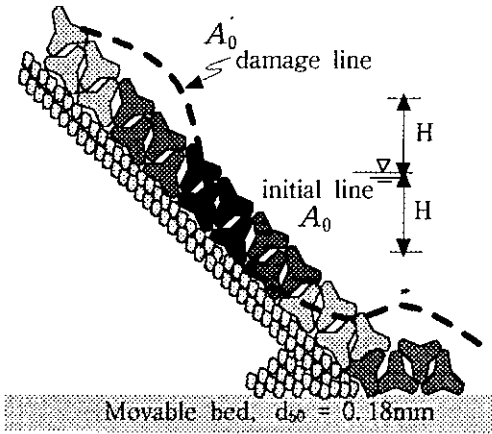


Fig. 7. Definition of the failure rate.

결정하였다.

$$D(\%) = A_0'/A_0 \times 100 \quad (5)$$

= (입의영역에서 이동한 파괴석수)
 /(입의영역에서의 전파괴석수)

파괴의 정의는 TTP의 초기위치로부터 그 대표길이 (l_0) 이상의 거리를 이동한 TTP를 파괴한 것으로 하며, rocking 운동은 파괴개수에 포함시키지 않았다. 또한 안정상태로부터 1개라도 파괴가 생기는 경우를 초기 파괴로 하여 그때의 파괴를 초기파괴 한계파괴라 정의하였다.

한편, 파괴율은 Fig. 7과 같은 사석방파제의 파괴특성을 고려하여, 가장 심하게 파괴를 생기게 하는 입사파에 의해 파괴가 core층(여기서는 사석층)까지 진행된 경우, 즉 TTP 대표길이의 수배에 달하는 core층이 넓게 드러나는 경우를 파괴율 $D=100\%$ 로 하였다.

4. 사석방파제의 파괴기구

4.1 합성유속의 방향별 빈도분포

파력에 의한 파괴는 사면상의 흐름특성 즉 최대수립 지속도를 합성유속의 방향별 빈도분포에 따라 파괴와 관련지어 검토하기 위하여 각 단면에서 측정된 작용유속의 탁월방향에 의한 빈도를 검토하였다. Fig. 8~Fig. 9는 계측된 유속의 시계열 데이터(1200개)에 의해 합성유속의 최대값으로부터 1/10최대값까지 합성유속의 방향별 빈도분포를 비교하여 나타낸 것으로, 그림중의 실선은 입사각 0° , 점선은 20° 에 해당되는 값이다. 이 그림

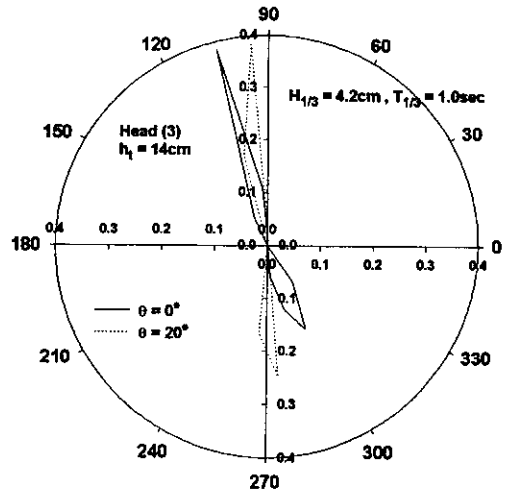


Fig. 8. Frequency distribution of each direction for 1/10 maximum value of the composite current at the head.

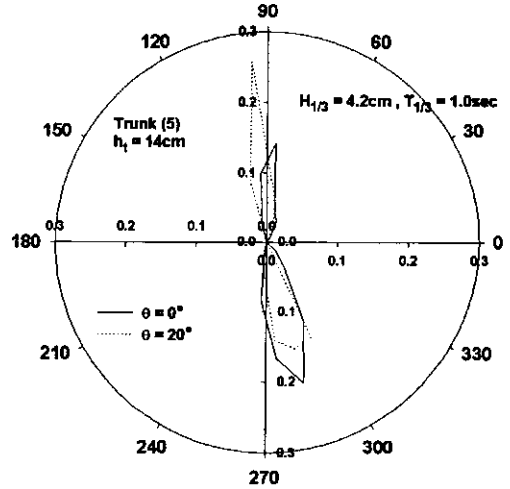


Fig. 9. Frequency distribution of each direction for 1/10 maximum value of the composite current at the trunk.

은 $H_{1/3}=4.2$ cm, $T_{1/3}=1.0$ sec의 경우에 방파제의 제두부(head)와 제체부(trunk)의 결과이다. 그림 중의 방향별 빈도분포의 값은 10° 간격으로 구한 방향별 도수를 최대유속의 1/10 이상의 총갯수로서 무차원한 상대도수이며, 탁월방향은 Fig. 6의 x, y축의 진행방향으로서 x축은 0° , y축은 90° 로서 각각 나타낸 것이다. Fig. 8은 head부의 방향별 빈도분포로서 up-rush가 주요한 작용유속으로 판단되며, 직각입사하는 경우는 회절파에 의한 영향이 클 것으로 생각된다. 경사입사하는 경우에는 head부 사면상에 직접적인 파력이 클 것으로 판단된다. 파

라서 방파제 head부의 피해패턴은 이러한 작용유속 패턴의 차이로 인한 파괴가 발생할 것으로 생각할 수 있다. 그렇지만, Fig. 9에서와 같이 방파제의 trunk부에서는 사면상의 up-rush와 down-rush가 주요한 작용유속으로 경사 입사하는 경우에 up-rush가 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

한편, 입사파의 방향성에 의한 방향별 빈도분포는 Fig. 10과 같으며, 그림중의 실선은 입사각 0°, 점선은 20°, 짧은 파선은 30°, 이점쇄선은 40°, 긴 파선은 60°에 해당되는 값들이다. 또한 이 그림은 방향성불규칙파에 의한 빈도분포로서 규칙파와 같이 up-rush가 주요한 작용유속으로 판단되지만, 입사각 20°~40°에서 down-rush에 의한 영향이 상당할 것으로 생각된다. 이들 결과는 사석방파제의 안정성에 미치는 외력인자로서, 설계상 고려되어야 할 파라메타의 하나인 수립자속도의 영향(柳, 1984)을 본 연구에서는 입사파의 방향별 빈도분포로서 검토하였으며, 후술하는 파괴의 패턴과 대응되는 결과로서 논의하였다.

4.2 Hudson 식과 가설의 적용

식 (6)은 피복재의 소요중량을 산정하기 위해 이용되는 Hudson식이다. Hudson식은 1959년에 경사제 피복석의 소요중량 W 를 산정하는 식으로 제안된 것으로 많은 실험결과로부터 얻어진 우수한 식이고, 각종 피복재의 설계에 폭넓게 이용되고 있다.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{[K_D(S_r - 1)^3 \cot \alpha]} \tag{6}$$

여기서, W 는 피복석 1개의 중량, γ_r 는 사석이나 블록의 공기중의 단위체적중량, H 는 설계계산에 이용되는 파고, S_r 은 사석이나 블록의 해수에 대한 비중, α 는 사면경사, K_D 는 피복석의 형상 및 피해율에 의해 정해지는 정수를 각각 나타낸다.

그러나 이 설계식은 상술한 바와 같이 파고만의 함수이고, 사석중량은 파고의 3승에 비례하고 있지만, 파의 주기의 효과는 고려하지 않았다. 그래서 사면상의 흐름특성 및 유체력의 변동특성과 사석방파제의 파괴한계를 비교한 많은 연구결과에 의거하여 사석방파제의 파괴실험 결과를 파괴율로 나타내기 위하여 다음식과 같은 안정계수 N_s 를 도입하였다(柳, 1984).

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H_{D(\%)}}{W^{1/3} (S_r - 1)} = f\left(\theta, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \xi, D(\%), \nabla, \dots\right) \tag{7}$$

여기서 ξ 는 surf similarity parameter를 나타내며, θ 는 파랑의 입사각, $D(\%)$ 는 임의 면적에 대한 파괴율을 각각 나타낸다.

그리고 안정도 함수(stability function, ϕ)로 다음식과 같이 입사파의 방향성에 따라 초기파괴에 대해 평가하기도 하였다. 즉, Losada and Gimenez-Curto(1982)는 사면경사를 변화시켜 경사파로 간주할 수 있다는 가설

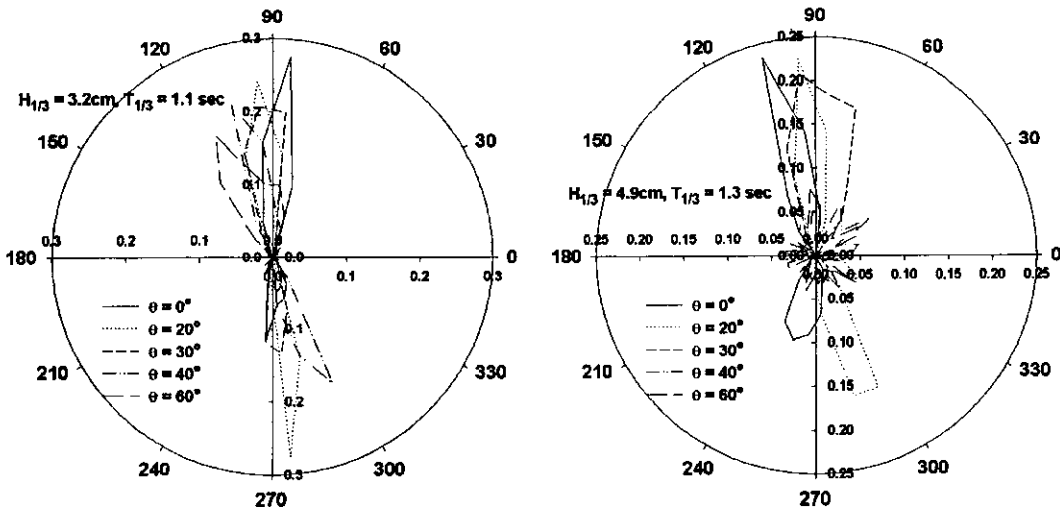


Fig. 10. Frequency distribution of each direction for the composite current of 1/10 maximum value under the directional irregular waves.

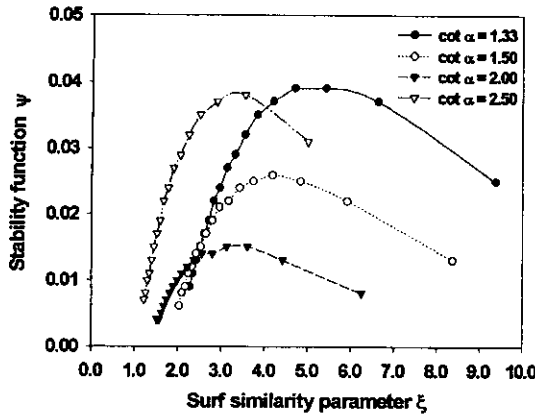


Fig. 11. The stability function for TTP. Initiation of damage.

로서, 직각 입사파에 대해 대응되는 경사파를 가정한 것이다. 따라서 파랑의 입사각이 커지면 사면경사 $\tan\alpha$ 가 작아진다는 기본적인 가정을 내세웠다.

$$\phi(\theta) = A_{\theta}[\xi_{\theta} - (\xi_0)_{\theta}] \exp\{B_{\theta}[\xi_{\theta} - (\xi_0)_{\theta}]\} \quad (8)$$

$$\xi_{\theta} \geq (\xi_0)_{\theta}$$

$$\xi_{\theta} = \tan\alpha \cos\theta / \sqrt{H/L_0} \quad (9)$$

$$(\xi_0)_{\theta} = 2.654 \tan\alpha \cos\theta \quad (10)$$

여기서, A_{θ} 와 B_{θ} 는 직각 입사파($\theta=0^{\circ}$ 일때의 A, B)와 사면경사 $\tan\alpha \cos\theta$ 에 대응되는 회귀계수이며, $\xi_0 = 2.654 \tan\alpha \cos\theta$ 는 최소의 surf similarity parameter ξ 를 나타내며, 최대 파형경사에 상당한다. A 와 B 는 사면이 이루는 각에 대응되는 회귀계수를 나타낸다(Losada and Gimenez-Curto, 1982). 즉, 안정성에 관한 사면경사각의 주요한 영향은 계수 A, B 와 surf similarity parameter ξ 에 포함되어 있다.

상술한 가설의 정의에 따라 Fig. 11과 같이 사면경사에 따른 초기파괴시의 한계를 나타낸 것으로 사면경사가 급해지면 상술한 안정수(stability number, N_s)의 최소치를 나타내는 ξ 의 값은 크게 되는 경향이 있다는 柳(1984)의 규칙파실험 결과와 일치하지만, 1:2.5의 사면경사와 같이 불안정하게 되는 제한된 안정조건을 갖는다는 것을 알 수 있다.

4.3 방향성에 의한 공간적인 파괴특성

함성유속의 방향별 빈도분포에 따라 stability number N_s , surf similaity parameter ξ , 안정도 함수 ϕ , 영향인자의 최대값의 비를 중심으로 사석방파제의 파괴한계를

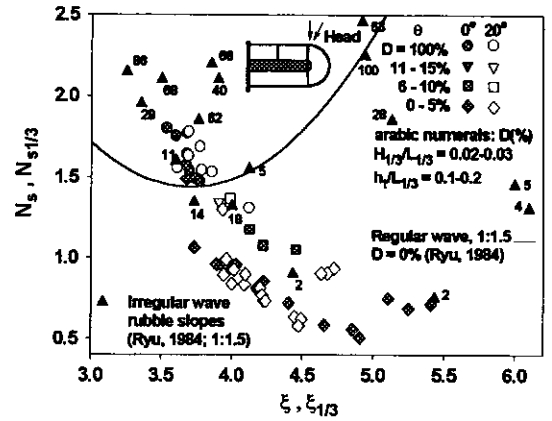


Fig. 12. Effect on the stability of the breakwaters head under the directional irregular waves.

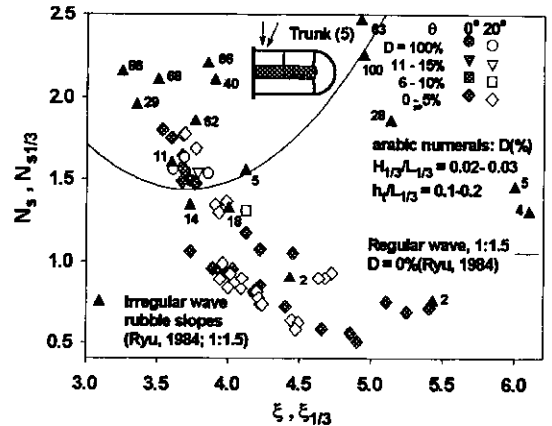


Fig. 13. Effect on the stability of the breakwaters trunk under the directional irregular waves.

논의하였다. 특히 다양한 입사각에 의한 입사파의 방향성에 대한 평가를 파괴와 관련지어 검토하면서 사석방파제의 안정성에 관련된 해석을 수행하였다.

Fig. 12~Fig. 13은 방향성불규칙파에 의한 파괴특성을 그때의 파괴율($D\%$) 마다 한테모은 $\xi_{1/3} - N_{s/1/3}$ 으로 나타낸 일레이다. 이들 그림에서 기호 ▲는 柳(1984)의 2차원불규칙파 실험결과이며, 숫자는 그때의 파괴율을 나타낸 것이다. 이들 그림에서 규칙파의 초기파괴한계는 불규칙파의 실험결과와 상당한 차이가 있으며, 안정성 평가시 유의해야 할 사항으로 판단된다. 파괴율의 정의에 차이는 있지만, 불규칙파 실험시 사석사면보다 TTP사면이 오히려 불안정하다는 것을 알 수 있으며, 이는 stability number $N_{s/1/3}$ 의 값과 초기파괴한계로서 판단할 수 있다. 또한 경사 입사파에서 큰 피해를 나타낸다는 중

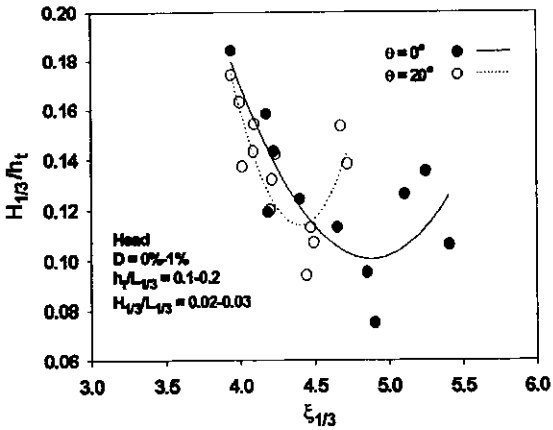


Fig. 14. Damage mode in related to the wave directionality at the head ($=D_{0\%-1\%}$).

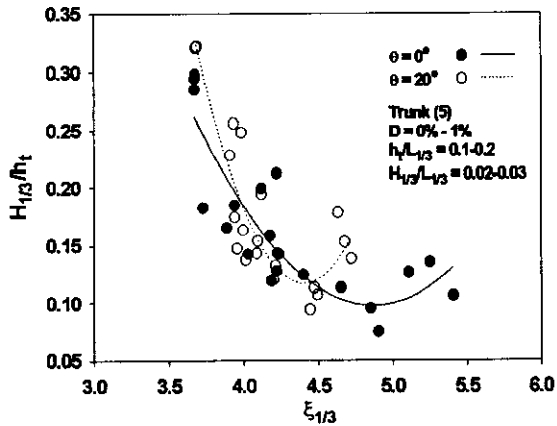


Fig. 15. Damage mode in related to the wave directionality at the trunk ($=D_{0\%-1\%}$).

래의 연구결과(Matsumi *et al.*, 1994)와 일치하고 있으나, 데이터의 분산이나 실험상의 여러 여건이 꼭 같다고는 할 수 없기 때문에 명확한 판단을 내릴 수는 없다.

Fig. 14~Fig. 15는 안정성에 미치는 외력인자로서 생각되는 surf similarity parameter $\xi_{1/3}$ 와 상대파고 $H_{1/3}/h_t$ 를 변화시켜 방파제 head부와 trunk부에서 얻어진 파괴율 1% 이하의 결과로서 초기파괴한계를 각각 나타내었는데 적각 입사하는 경우가 위험하다고 판단할 수 있다. 이들 방향성규칙파에 의한 안정성의 목시관측 결과 $H/h_t > 0.5$ 가 되면, 사면이 불안정하게 되어 회복된 사면상의 TTP가 파괴된 부분에 군데 군데 사석층이 드러나는 spot현상과 같이 core층이 드러나게 되었으며, 더욱이 연속되는 고파랑으로 인하여 core층이 더 넓게 확장

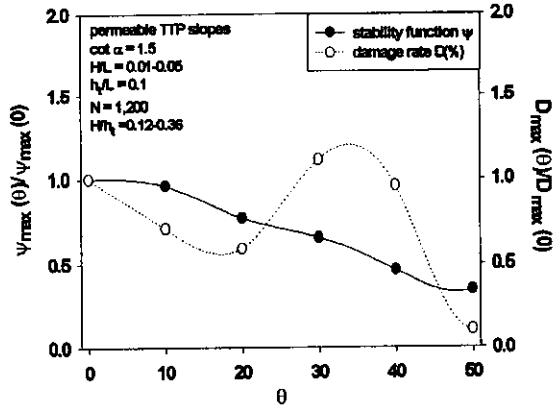


Fig. 16. Influence of wave incidence angle on the stability of TTP slopes under the directional regular waves.

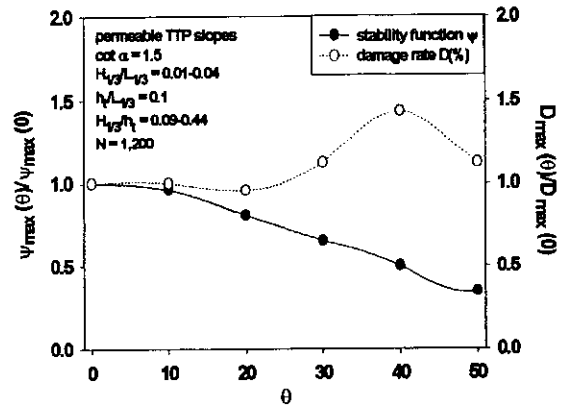


Fig. 17. Influence of wave incidence angle on the stability of TTP slopes under the directional irregular waves.

되어 상술한 파괴의 정의에 따라 완전파괴($D=100\%$ 에 해당)에 이르는 경우가 많았다.

구조물의 안정성 평가시 상술한 가설, 식 (8)을 이용하여 Fig. 16~Fig. 17과 같이 안정도 함수(stability function ϕ)의 최대값의 비($=\phi_{\max}(\theta)/\phi_{\max}(0)$)를 이용하여 파랑의 입사각에 따라 안정성을 검토하였다. 안정도 함수 ϕ 는 입사각이 증가할수록 안정성이 높아지지만, 파랑의 최대값의 비($=D_{\max}(\theta)/D_{\max}(0)$)는 방향성규칙파에서 30°, 방향성불규칙파는 40° 부근에서 피크가 나타나는 것으로 보아 안정도 함수 ϕ 의 최대값의 비와는 일치하지 않는다. 즉, 파랑의 방향성 효과로 인하여 규칙파에서는 30°, 불규칙파에서는 40° 부근에서 안정성이 낮다고 볼 수 있다. 이는 방파제 사면의 피해면적과 파고와 주기의 결합확률분포를 고려하여 입사파 0°일 때

보다 37°일 때 초기파괴가 먼저 발생하여 피해면적도 상대적으로 크게 분포하는 정성적인 연구결과(Losada and Giménez-Curto, 1982)와 일치하고 있으나, 실험조건들이 다소 차이가 있으며, 특히 사면경사의 영향이 클 것으로 판단된다. 추후 사면경사 및 실험조건을 다양화시켜 안정성에 미치는 외력인자를 정리함과 아울러 수치모델에 의한 재현을 진행하기로 한다.

5. 결 론

사석방파제의 안정성에 미치는 영향인자의 평가, 특히 입사파의 방향성에 대한 평가를 수행하였으며, 연구과정에서 밝혀진 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

파랑의 입사각 0°와 20°에 대한 안정성 평가시 안정성에 미치는 외력인자로서 생각되는 surf similarity parameter $\xi_{1/3}$ 와 상대파고 $H_{1/3}/h$ 를 변화시켜 방파제 head부와 trunk부에서 얻어진 파괴율 1%이하의 초기파괴한계와 $N_{s1/3} - \xi_{1/3}$ 의 초기파괴한계로부터 직각 입사하는 경우가 피해를 많이 받는 전형적인 결과를 얻었다.

파랑의 다양한 입사각에 따라 사석방파제의 안정성을 논의한 결과, 방향성규칙파에서는 30°, 방향성불규칙파에서는 40° 부근에서의 파괴율이 입사각 0°일 때 보다 상대적으로 크게 변동하였다. 즉, 사석방파제의 안정성에 미치는 방향성효과에 따른 것이라고 평가할 수 있다. 이러한 결과는 1/10 최대 합성유속의 방향별 빈도분포의 피크가 20°~40°에서 발생하는 사실과 대응된다고 생각된다.

감사의 글

수리실험에 협조해주신 부경대학교 해양공학과 해안·항만공학연구실의 대학원생 및 학부생들에게 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Goda, Y., 1985. Random sea and design of marine structures, University of Tokyo Press, pp. 1-323.
- Losada, M.A. and L.A. Giménez-Curto, 1982. Mound breakwaters under oblique wave attack; A working hypothesis, *Coastal Engineering*, **6-1**, pp. 83-92.
- Matsumi, Y., Mansard, E.P.D., and Rutledge, J., 1994. Influence of wave directionality on stability of breakwater heads, *Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1397-1411.
- Ryu, C.R. and Sohn, B.K., 1999. Stability criteria of rubble mound structures under the irregular sea conditions, Proceedings of the international conference coastal structures '99, ASCE, pp.223-230.
- Takayama, T., 1982. Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-makers, Rep. the Port and Harbor Research Institute, **21(2)**, pp. 3-48.
- 柳青魯, 1984. 捨石防波堤の水利學的最適設計に關する基礎的研究, 日本大阪大學博士學位論文, 165pp.
- 柳青魯, 金憲泰, 孫炳奎, 李泰煥, 1999. 捨石護岸の斷面的·平面的安定性と水利特性, 海岸工學論文集, **46**: 886-889.
- 荒木進歩, 出口一郎, 1997. 捨石防波堤の斷面變形に關する研究, 海岸工學論文集, **44**: 531-535.