

경사식 방파제의 형상에 따른 월파량 및 반사율 실험 연구

손병규* · 김홍진** · 안희춘*

*국립수산과학원 수산공학팀

**부경대학교 해양공학과

Experimental Study of the Wave Overtopping/Reflection Rate on the Shapes of Rubble Mound Structures

BYUNG-KYU SOHN*, HONG-JIN KIM** AND HEUI-CHUN AN*

*Fisheries Engineering Division, NFRDI, Busan, Korea

**Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Damage Mode 피해모드, Breakwater 방파제, Hydraulic Model Experiment 수리모형실험, Wave Overtopping 월파, Reflection Rate 반사율

ABSTRACT: All of the design criterion are not only formulated by an internal study, concerning the design of maritime structures, but also by the guarantee that internal design technology is essential, at least according to theoretical and experimental studies. Furthermore, the basic data, which is necessary for the development of a more stable design of breakwater structures, should be ensured, according to current research and analysis of damage created by water waves.

According to the necessity to solve the problems that occur in the design and construction of ocean structures, until now, it is recognized that the hydraulic experiments are important. This paper provides the design of structures to decrease the energy created by waves. Suggestions to make contributions to the development of ocean/fisheries technology are also discussed. It is better to use S-type coastal structures/breakwaters than to use uniform type breakwaters, concerning stability, reflection, and overtopping.

1. 서 론

다양한 연안역 방재시설중에서 방파제는 입사파랑을 제어하여 항만이나 배후지역의 기능을 유지시킬 목적으로 건설된 가장 기본적이고 중요한 연안시설물중의 하나이다(해양수산부, 1999). 이들 방파제는 설계조건을 다소 상회하는 고파랑에 대해서도 다소의 피해를 받더라도 방파 기능이 크게 잃지 않는 구조가 바람직하다(손병규와 류정로, 2001; Ryu et al., 1999).

이와 더불어 구조물의 안정성과 관련된 수리실험은 이들의 재현성이나 타당성을 확인하기 위해 현지 관측데이터의 비교가 필요하지만, 현지 상황은 매우 복잡하여 피해가 발생한 방파제와 관련된 외력인자를 직접 산정하기에는 어려운 실정이다. 특히, 쇄파와 관련한 현상이나 구조물에 작용하는 파력, 호안이나 방파제의 월파 현상 등의 문제는 수리모형실험이 현상해명의 주요한 수단이 되고 있다(Takayama, 1992).

최근에는 해안구조물의 저천단, 월파제어 등 기능 강화에 따른 새로운 설계개념의 하나로 도입되고 있는 복합단면의 기능을 통해 제체의 안정성을 향상시키려는 노력이 강구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내·외 방파제의 피해사례를 조사하여 주요한 피해형태에 관해서 검토한 후, 구조물 설계시 안정성 확보를 위한 단면의 한계를 월파량, 단면의 형상 등과 관련지어 검토하고자 한다.

2. 방파제의 피해사례

2.1 방파제의 파괴모드

국내·외의 항만은 방파제의 구조형식에 따라 채용되는 사례가 지역, 지형적인 특성 등에 따라 다르다. 국내의 경우에는 경사식 방파제가 주로 채용되고 있으며, 일본의 경우는 케이슨제가 널리 이용되고 있다. 서구에서는 국내와 마찬가지로 경사제가 많이 이용되고 있지만, 수심에 따라 방파제의 형식을 다르게 하고 있다. 이러한 방파제의 피해사례를 살펴보면, 국내의 경우는 비교적 자료의 축적이 적으며, 일본은 일찍이 1960년대부터 이들 방파제의 피해사례에 대한 근본적인 대안을 찾기 위하여 많은 노력을 해왔다.

항만의 대표적인 외곽시설인 사석방파제의 파괴모드는 Fig. 1과 같이 나눌 수 있다.

2.2 일본의 방파제 피해사례

방파제의 피해상황이 정확히 파악되면 설계기술의 발전에

제1저자 손병규 연락처: 부산광역시 기장군 시랑리 408-1
051-720-2591 bksohn@nfrdi.re.kr

크게 기여한다는 것은 시사하는 바가 크다. 또한, 피해사례는 방파제의 기능 저하를 방지하기 위해 유지공법 개발에도 유용한 자료로 이용되고 있다. 이러한 방파제 피해사례는 4회에 걸쳐 각각 편찬되었으며, 이들 자료에는 복구예정금액이 3,000만엔 이상, 또는 시공중 피해를 입은 케이슨제부터 콘크리트까지 시공한 단계로서 본체의 이동 또는 파괴가 발생한 것이며, 피해 전·후의 도면이 비교적 양호하며, 피해상황이 잘 정리된 것이다(Kitajima et al., 1968; Takeyama and Nakayama, 1975; Hattori et al., 1984; Miyai et al., 1993).

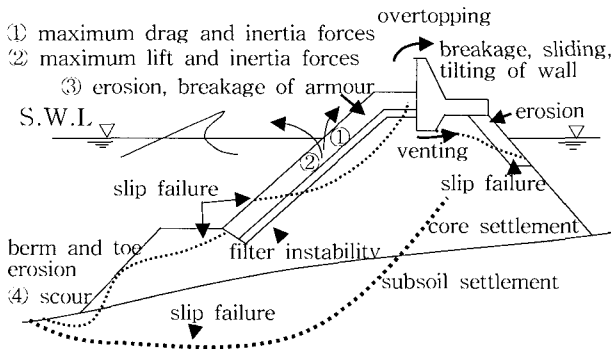


Fig. 1 Failure mode of a rubble mound breakwater with superstructure

Fig. 2는 1983년부터 1991년 사이에 발생한 피해가운데 기상요인과 피해형태를 각각 나타낸 것이다. 이 그림에서는 태풍, 동절기풍랑에 의한 피해수가 대부분을 차지하고 있다. 일본은 케이슨식 방파제가 대부분을 차지하고 있기 때문에 제체의 활동, 전도되는 피해와 더불어 소파공, 기초공의 피해가 복합적으로 일어나는 것을 알 수 있다.

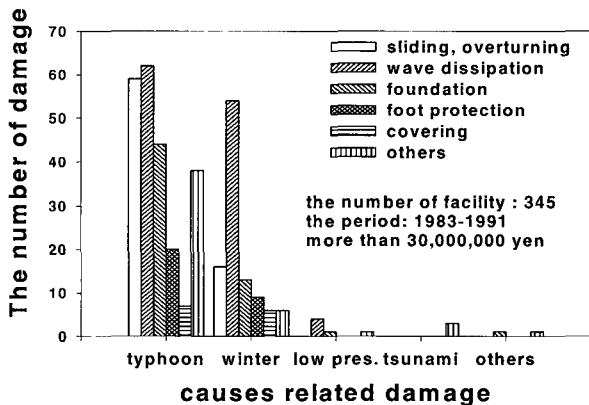


Fig. 2 Number of overall damaged facilities by major causes and situations in Japan

일본의 피해사례중 ① 시공완료 상태의 경우, ② 피해당시의 관측자료, 도면 등의 피해상황이 비교적 상세히 서술된 사례, ③ 구조물의 용도별 분류중 방파제의 경우, ④ 구조형식별로 분류하여 혼성제, 소파블록피복제, 경사제에 해당되는 경우, ⑤ 설계파의 파소/파대 평가의 경우에 해당되는 총 78

사례수에 대하여 방파제의 배치형상에 따라 피해지점별 피해 사례수는 Fig. 3과 같다.

이 그림에서 직립제는 42 피해사례중 설계파고 이상 ($H_i/H_D > 1.0$)이 71%, 설계파고 이하 ($H_i/H_D < 1.0$)가 29%이며, 설계파고 이상의 경우 방파제의 제간부, 제두부~제간부에서 피해가 두드러졌으며, 전연장에 걸친 피해는 4 사례나 되었다. 그렇지만, 설계파고 이하의 경우 제두부~제간부에 걸친 피해가 두드러졌으며, 제간부 및 방파제가 밀착이 있는 굴곡부에서 피해가 다소 나타났다.

소파블록피복제는 20 피해사례중 설계파고 이상이 67%, 설계파고 이하가 33%이며, 설계파고 이상의 경우 방파제의 제간부, 밀착부에서 피해가 두드러졌으며, 방파제의 전연장, 제두부, 제두부~제간부는 2사례, 2사례, 1사례씩 각각 나타났다. 설계파고 이하의 경우에는 제두부에 피해가 주로 발생하였다. 제두부 이외의 방파제의 배치형상에서 1사례씩 각각 나타났다. 일본의 소파블록피복제는 혼성제의 약점중의 하나인 파압을 완화시킬 목적으로 혼성제 전면에 테트라포드와 같은 이형블록을 설치하였기 때문에 혼성제의 설계식을 어느 정도 준용하고 있으며, 소파블록피복제의 안정성의 검토는 현재까지도 수리모형실험에 의존하는 실정이다. 최근에 소파블록피복제의 피해사례가 많아지고 있는 이유는 혼성제의 피해발생 시 복구는 대부분의 경우 이형블록을 천단까지 거의 쌓아올리는 예가 많기 때문이다.

경사제는 16 피해사례중 설계파고 이상이 67%, 설계파고 이하가 33%이며, 설계파고 이상의 경우에는 방파제의 전연장, 제간부, 제두부~제간부, 제두부 순으로 피해가 나타났으며, 설계파고 이하의 경우에는 전연장, 제두부~제간부, 제간부에 걸친 피해가 발생하였다. 방파제의 밀착이 있는 굴곡부에서 피해가 없는 것은 일본의 경사제는 대부분 직선부의 배치형태로 구성되어 있기 때문이라고 판단되며, 방파제 전체의 구성비율로 보면 혼성제, 소파블록피복제에 비해 상대적으로 작은 부분에 지나지 않는다고 생각된다.

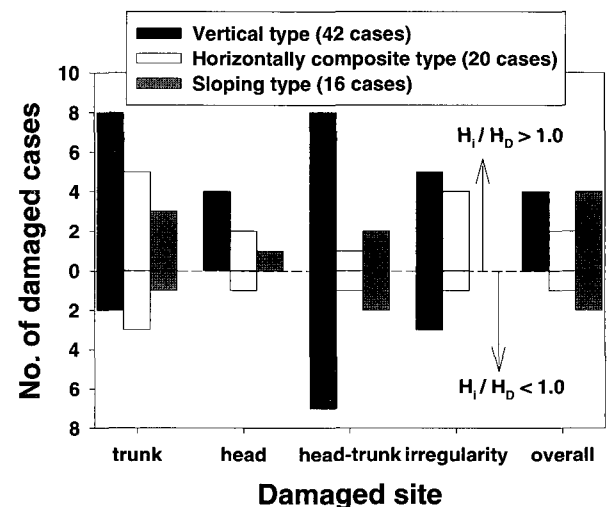


Fig. 3 Frequency of occurrence site according to arrangement shape of breakwater in Japan

2.3 국내의 방파제 피해사례

국내 경사제의 피해형태는 피복석 및 사석유실이 대부분이며, 피해를 유발하는 기상요인은 태풍이 지배적이었다(정규섭, 1997). 그리고 설계과고의 과소평가, 체제 안정성의 미확보, 지반침하, 체제 구성재료의 부식, 마모 등으로 인한 피해사례도 많이 나타났다(이진오, 1995).

해운항만청이 발족한 이래 24년간(1976년-1999년) 발생한 주요 항만시설물 및 지정어항에 대해 피해사례를 조사·분석하였다. 수집한 피해사례 가운데 37항만 59사례에 대해 분석하였으며, Fig. 4는 기상요인에 따라 발생한 피해시설수를 나타낸 것으로 태풍에 의한 피해가 대부분을 차지하며, 소파공, 피복공, 사석공의 피해수가 상당한 비율을 나타내고 있다. 경사제의 구성상 Fig. 1과 같이 파력이 직접 작용하는 소파공이나 피복공에 피해가 발생하면 상부공, 사석공, 기초공 등이 연쇄적으로 피해가 발생하는 복합적인 피해가 발생함을 알 수 있다.

주요 항만별 피해사례를 반복횟수로 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. 조사기간동안 동해안에서 발생한 최대 피해반복횟수는 3회이며, 죽변항, 후포항, 도동항이 이에 해당된다. 남해안에서는 부산남항이 4회에 이르는 피해가 반복되었으며, 특히 부산남항의 경우 반복적인 피해가 발생할 수 밖에 없는 지리적인 여건 때문이라고 판단된다. 서해안에는 파랑에 의한 직접적인 피해가 상대적으로 저조하며, 4개 항 모두 피해발생 반복횟수가 1회에 그치고 있다.

동해안과 남해안에 위치한 항만은 피해가 한번 발생한 곳에서 재피해가 발생하는 경향이 뚜렷하며 이는 복구공사의 시행에 있어 경제적 여건 및 기타 사정으로 인하여 원상복구 수준으로 복구되는데 기인하는 것으로 판단된다.

전체 항만에 대한 피해사례수가 그리 많지 않은 것은 피해상황 보고의 누락, 경미한 피해의 자료 부족 등에 기인하여 발생횟수가 적게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 사석경사제의 장점중 하나인 유지보수의 용이성을 감안하더라도 설계의 신중을 기할 것이 요구된다.

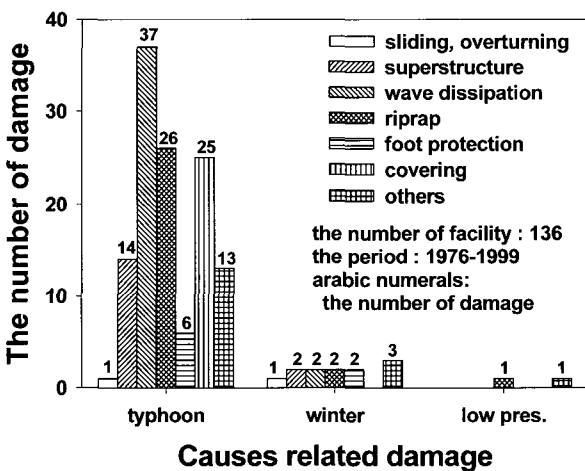


Fig. 4 Number of damaged facilities by major causes and situations in Korea (37port, 59 cases)

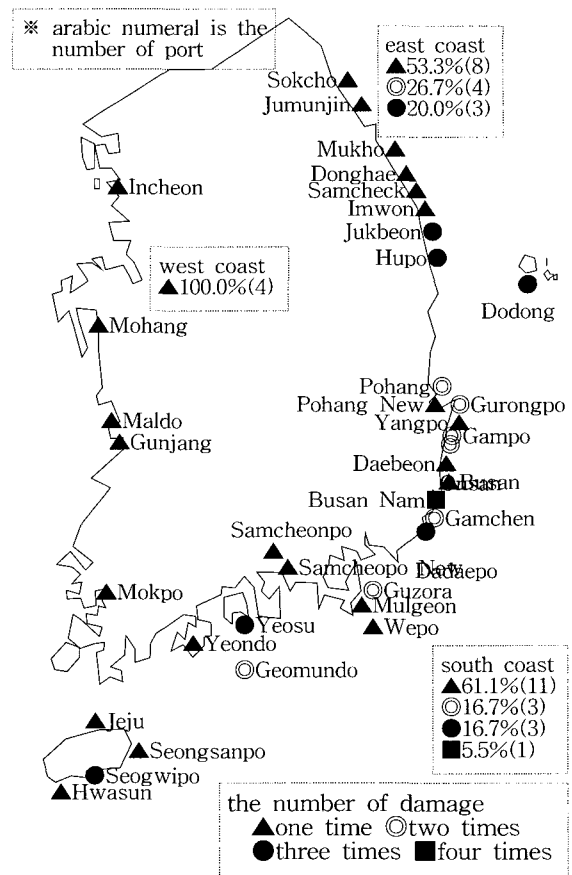


Fig. 5 Number of damaged port in Korea (1976-1999yr., 37port, 59cases)

3. 부산신항 동방파제의 피해 재현실험

전술한 피해사례 가운데 방파제의 제두부 및 제간부에 걸쳐 소파공(TTP)으로 피복되어 있는 경우에 피해발생 빈도가 태풍 및 겨울철 폭풍파에 의해 많이 발생되었다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 구조물의 형식은 국내의 대표적인 구조형식인 경사식 구조물에 대해 적절한 친단고의 결정, 허용월 파랑 제어방법에 관해 구조물의 기하학적 특성과 입사파랑과의 상호작용을 검토하고자 하였다. 그래서 최근 태풍 매미(2003년 9월, 14호 태풍)에 의해 피해가 발생된 부산신항 동방파제의 피해원인 및 이에 따른 재현실험을 수행하였다.

3.1 실험방법 및 조건

본 실험의 조건은 크게 구조물의 조건, 입사파랑의 조건, 저면의 조건으로 구성할 수 있다. 구조물의 조건은 저천단으로 하였으며, 이는 월파의 영향이 구조물의 안정성 및 기능성에 직접적인 영향을 주기 때문이며, 또한 기초부의 효과가 중요한 조건이므로 실험의 대상을 저천단 기초부 방파제로 결정하였다. 대상구조물은 실제 연약지반에 설치된 저천단 방파제인 부산신항 방파제의 단면을 대상으로 하였다.

부산신항 동방파제는 가덕도 서안에 위치하고 있으며 총연

장 600 m의 사석식 경사제이며, 제체부에는 20 ton, 제두부에는 32 ton의 T.T.P.로 피복되어 있다.

구조물의 제원은 현장 조건으로 수심 20m, 전면 피복석은 T.T.P. 이며, 전면 피복석의 경우 1:1.5의 경사로 내부사석은 0.03m³의 입경을 가지도록 하였다. 입사하는 파랑 조건은 대상해역의 설계파랑인 주기 12~14sec, 파고 4.0~5.5m 에 대해 Froude 상사법칙을 적용하여 구성하였다. 불규칙파랑은 비파괴 조건을 적용하였으며, 소단의 길이는 유효 소파효과가 나타나는 입사파랑의 1/4 파장을 대상으로 하였다(C.E.R.C., 1984).

또한, 사석방파제의 내부 흐름에 관해서는 정상 침투실험에 의한 침투류의 축척효과의 발생한계 $Re_{core} < 2 \times 10^3$ 로 되도록 core층의 투수성을 만족하는 범위내에서 축척효과가 발생하지 않도록 투수계수를 유지하였다(손병규와 류청로, 2001).

피해원인에 대한 재현실험은 수심을 만조시를 고려한 14.5m를 적용하였으며, Fig. 6과 같이 부경대학교 3차원수조(20m×20m×1m)를 이용하여 수조내에 1:100 모형을 설치하여 실험을 수행하였다.

실험조건은 Table 1과 같이 목표스펙트럼은 JONSWAP스펙트럼으로 불규칙파 신호를 작성하였으며, 파랑의 재현성은 계측 스펙트럼과의 비교를 통해 확인하였다.

Table 1 Experimental conditions

Scale(1:40)	Physical parameters	Value
Wave conditions (Irregular wave)	$H_{1/3}$ (cm)	6~17
	$T_{1/3}$ (sec)	1.5~2.5
	Spectrum	JONSWAP
	Depth (cm)	45
Structure conditions	Armor	TTP (500 g)
	Core	Riprap (3-10 g)
	Slope	1 : 1.5
	Depth (toe)	45 cm
	Berm(height/length)	5~10/7~14cm
Bottom conditions		Smooth
	Slope	1 : 30
	Wave number	1000

3.2 실험결과

태풍 매미에 의한 동방파제의 피해는 주로 제두부에 집중되었으며, 제두부의 T.T.P (32 ton)와 상치콘크리트 1개 구간이 침하하였다. 피해시 관측된 파랑은 주기 15 sec, 파고 7.4 m 이며, 입사파향은 구조물에 15° 경사를 가졌던 것으로 보고되고 있다(국립방재연구소, 2003). 동방파제의 제두부는 장주기 고파랑의 내습에 따른 대표적인 파괴모드를 보이며, 해일에 의한 수위상승으로 인해 제두부 상치콘크리트의 파괴가 보고되고 있다. 제체부의 경우 배후면 피복석의 일부가 파괴되었으며, 전면 T.T.P의 경우 교란이 발생되었을 뿐 이탈의 파괴는 발생하지 않았다.

Fig. 7은 피해재현 실험장면이며, 수위상승은 상치콘크리트 하부와 T.T.P의 상호간섭을 초래하며, 초기에 고파랑으로 파괴된 T.T.P 아래의 중간피복석이 유실되어 상치콘크리트의 침하, 파괴가 야기되었다.

이러한 결과는 제두부의 피복재의 중량이 제간부의 1.5배 이상이 되어야 한다는 Hudson식의 한계를 보이는 것으로 적정한 안정계수의 산정이 필요하며, 또한 제두부의 연장선의 범위 및 폭풍의 지속시간 등 제두부의 수리학적 특성이 아주 복잡한 점을 감안하여 지속적인 연구가 필요하리라 판단된다.

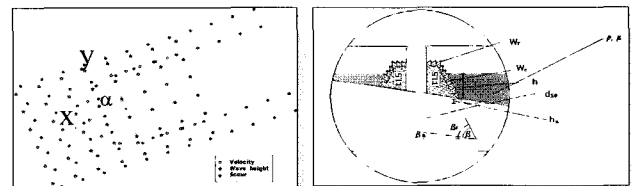
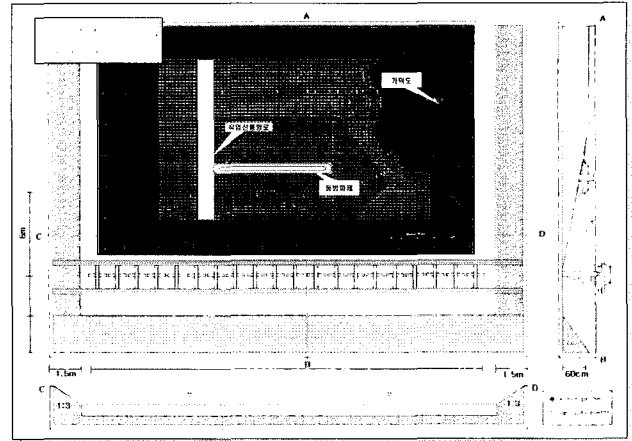
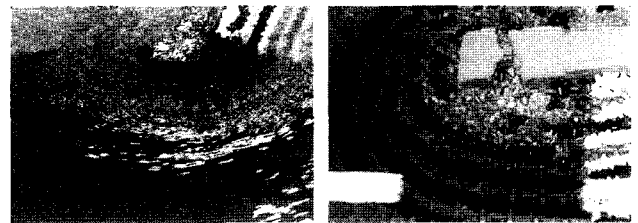


Fig. 6 Experimental setup



(a) Extent of damage

(b) Destroyed T.T.P



(c) Destroyed cap concrete

Fig. 7 Reappearance photo of damage at the head of east breakwater in the Busan New Port

4. 복합단면의 수리학적 특성 실험

부산신항 동방파제의 피해 재현실험을 통해 제두부의 경우 32ton의 중량에도 불구하고 제두부에 국한되어 피해가 발생하였다. 따라서, 피복석의 중량과 제두부의 중량은 조정되어

야 하며, 이러한 피복석 중량산정식의 한계를 극복한 경사식 구조물의 설계를 위해 복합단면형식에 대해 검토하였다.

또한, 최근에는 연안공간을 친수공간으로 조성할 필요성이 대두됨에 따라, 경관자원을 이용한 저천단 방파제의 개발이 강조되면서 천단고의 감소방법과 이에 따른 월파량의 제어대책이 필요하다.

이러한 복합단면의 특징을 파악하기 위하여 기존의 단순경사제(uniform type)와 소파공을 설치한 berm type 경사제 그리고 복합단면 경사제에 대해 구조물의 설치수심과 입사하는 파랑조건을 조정하여 월파량과 반사율의 발생 특성을 검토하였다.

4.1 실험방법 및 조건

본 실험은 국립수산과학원 수산공학수조동 2차원수조(1.2H×1.0W×30.0L) 및 부경대학교 해양수리실험소 2차원 수조(1.0H×1.0W×35.0L)에서 각각 수행되었으며, 규칙파 및 불규칙파를 이용하였다. 조파기의 배후와 끝단에는 금속 용수철을 이용한 경사형 소파제가 설치되어 반사파에 의한 파랑장의 교란을 최소화되도록 하였다. 또한, 구조물을 설치하지 않은 경우에 가장 양호하게 재현되는 조파영역을 유효영역으로 결정하였으며, Fig. 8과 같이 검출된 조파신호는 목표스펙트럼과의 비교 및 Goda and Suzuki(1976)의 입·반사 분리방법으로 확인하였다.

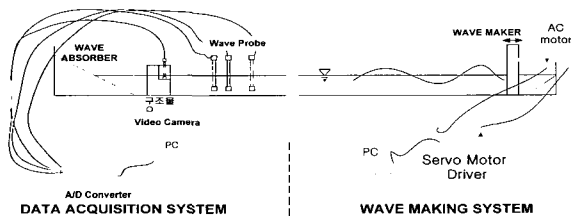


Fig. 8 Wave generating System

월파량의 측정은 용량식 수위계를 설치하여 월파에 의해 월류량을 저수조 내의 수위증가로 계측하였다. 월류수조의 보정은 메스실린더를 이용하여 수위의 변동을 계측하여 보정값을 획득한 후, 각 시간에 따른 월파량 시계열을 계측하였다.

월파 및 파랑관측시간의 작용파수는 파랑의 발달 및 파수에 따른 파괴의 진행을 검토하기 위해서 유의파 주기를 기준으로 할 때 1000파 이상을 계측하였으며, 실험은 디지털 화상 녹화기(VX-2000, IP5) 및 디지털카메라(F-707)를 이용하여 구조물의 기하학적인 안정성을 평가하였다.

사석방파제의 안정성 평가시 정량적인 파괴와 파괴율의 정의는 필수적이다. 파괴는 피복석(블럭)의 크기만큼의 이동 즉, 초기설치 위치를 벗어난 피복석(블럭)을 파괴라고 정하고, 전체피복석의 수에 대한 이동한 피복석의 백분율을 정의한다(CERC, 1984). 본 실험에서는 파괴율의 정의에 따라 파괴율 5%이내를 만족하는 범위내에서 실험을 수행하였으며, 실험조

건은 전술한 바와 같이 비쇄파 조건을 적용하고, 소단의 길이 또한 입사파랑의 1/4 파장을 대상으로 하였다(C.E.R.C., 1984).

Fig. 9는 2차원 단면수로에 설치된 각 기본 단면의 배치도를 나타낸 것으로, 경사제 단면도(해양수산부, 1999)를 기초로 구조물을 구성하였다. 실험조건은 상당심해파를 사용하여 파형경사(=H/L) 0.015~0.02, 상대파고(=H0/ht) 0.3~0.65인 불규칙파를 적용하였다.

4.2 실험결과

Fig. 10은 각 단면에서 계측된 월파량과 상대파고의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 단순경사제의 경우 월파량이 상대파고가 0.4에서 0.5의 구간에서 피크를 보이며, 상대파고의 증가에 따라 월파량이 감소하였다. 일반적으로 파고의 증가는 월파량의 증가를 야기하나 상당심해파고의 증가는 천수영역에서의 쇄파의 발생을 증가시키며, 사면상의 처오름 높이에도 영향을 미쳐 월파량이 감소하는 경향을 보인다. 또한 소단 형식 경사제의 경우 단순경사제보다는 월파량의 편차가 크지 않다. 복합단면의 경우 상당심해파고의 변화에 따라 큰 월파량의 변화는 보이지 않고 있다. 따라서 복합단면에서의 월파량의 균일한 발생은 구조물에서 월파량이 감소하는 효과와 함께 구조물의 안정적인 설계를 고려할 수 있다는 장점을 알 수 있다.

Fig. 11은 상대파고에 따른 반사율의 변화를 나타내고 있으며 복합단면에서 현저한 반사율의 감소를 보이고 있다. 이러한 복합단면에서의 반사율 감소는 체재 피복석의 안정성도 도모할 수 있음은 물론 방파제 건설에 따른 인근 시설물에 미치는 반사파의 영향도 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

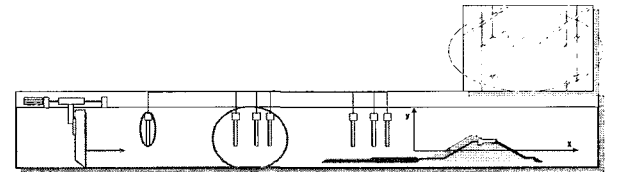


Fig. 9 Experimental setup(sectional shape)

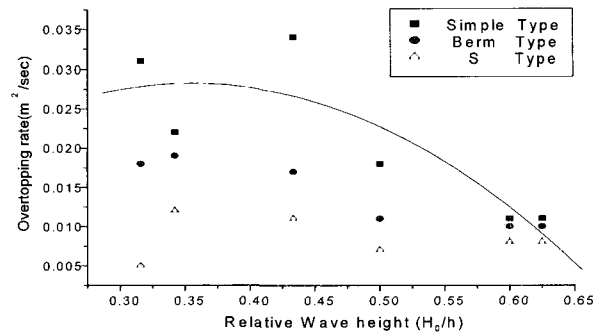


Fig. 10 Variation of overtopping rate with respect to the structure shape

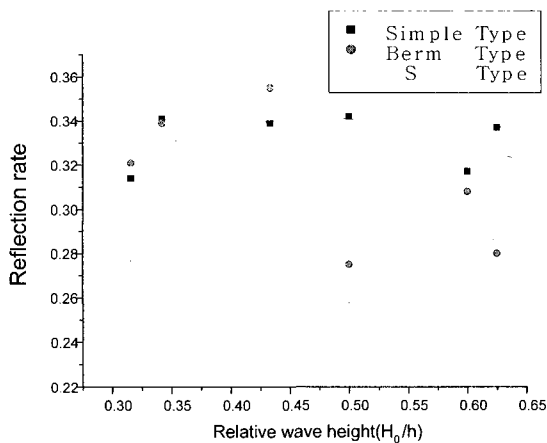


Fig. 11 Variation of reflection rate with respect to the structure shape

5. 결론

방파제의 피해사례를 조사하여 그 피해원인을 태풍 등 기상적인 요인만 기술하고 있지만, 실제로는 두드러진 피해에 이르기까지 장기적인 변화가 진행되고 있기 때문에 피해에 이르기까지의 변형, 변화과정에 관해서는 연구가 계속 필요하다고 생각된다.

부산신항 동방파제의 피해재현실험을 통하여 기존 해안구조물의 중량산정식에 따른 단면설계의 한계점을 파악할 수 있었으며, 이로 부터 단면형식의 개선 및 설계개념의 재정립이 필요함을 강조할 수 있다. 또한, 경사제의 단면형식에 따른 수리학적 특성을 통해서 같은 피복석의 중량조건에서 반사율 감소와 월파량 특성에서 복합단면의 적용 가능성을 확인하였다.

이와 같이, 해양구조물의 설계·건설에서 발생하는 문제해결의 필요성에 따라 수리모형실험을 이용한 안정성의 평가는 재고할 필요가 있으며, 수치모델에 의한 재현성을 확인하는 노력이 또한 필요하다.

참고 문헌

국립방재연구소 (2003). "2003 태풍 매미 피해 현장 조사 보고서".

손병규, 류청로 (2001). "사석방파제의 안정성에 미치는 방향성효과에 관한 실험적연구", 한국해양·해양공학회지, 제13권, 제2호, pp 139-148.

이진오 (1995). 경사 방파제의 구조적인 피해원인에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.

정규섭 (1997). 한국 주요 항만 방파제의 피해원인 및 안전성 분석, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문.

해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준, pp1-1531.

C.E.R.C.(1984). Shore Protection Manual, Vol 2, US Army.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments", Proc. 15th conf., Coastal Eng., Honolulu, pp 828-845.

Hattori, C., Shibata, K. and Ohori, K. (1984). "Disasters of Breakwaters by Wave Action(Part-3)", The Technical Notes of the Port and Harbor Research Institute, No 485, 281p (in Japanese).

Kitajima, S., Nakano, T., Horii, O., Kakizaki, S., Furuhashi, K. and Hanaki, Y. (1968). "Disasters of Breakwaters by Wave Action", The Technical Notes of the Port and Harbor Research Institute, No 58, 239p (in Japanese).

Miyai, S., Ohira, K. and Shiomi, M. (1993). "Disasters of Breakwaters by Wave Action(Part-4)", The Technical Notes of the Port and Harbor Research Institute, No 765, 248p (in Japanese).

Ryu, C., Kim, H., Sohn, B. and Lee, T. (1999). "Hydraulic Characteristics of the Rubble Mound Structures and its Spatial Variation", Proc. 46th JCCE, JSCE, pp 886-889 (in Japanese).

Takayama, T. (1992). "Wave Maker Basin of Multi-directional Irregular Wave and its Experiments", Hydraulic Eng. Series 92-B-1, pp 1-28 (in Japanese).

Takeyama, H. and Nakayama, T. (1975). "Disasters of Breakwaters by Wave Action(Part-2)", The Technical Notes of the Port and Harbor Research Institute, No 200, 255p (in Japanese).

2004년 11월 15일 원고 접수

2005년 3월 25일 최종 수정본 채택