

방파제 피복제의 파괴율 산정

일정 주기와
일정 구조물의 경사하에서는
파고기 TTP 피복제의 피해율에
가장 많은 영향을 준다.
그러나 주기와 파고를 동시에 비교하면
피해율은 단지 파고만의 함수가 아니라
주기와도 밀접하게 관련되어 있다.
특히 동일한 파고를 갖는
여러 주기의 파랑 중에서 피복제에
최소 피해를 주는 파랑을
구할 수 있음을 알았다.

최 한 규 / 강원대학교 토목공학과 교수
이 철 응 / 강원대학교 토목공학과 강사

서 론

항만의 외곽시설인 방파제는 시설비의 규모가 클 뿐 아니라 자연재해에 가장 잘 노출되어 있다. 따라서 피해가 발생하면 그에 따른 피해 복구비가 막대하게 요구되어 안정하면서도 경제적인 단면의 설계가 요구된다. 방파제의 단면 설계에 요구되는 필수적인 제원은 설계 해면, 설계 파고, 방파제 단면에 따른 도파고와 월파랑, 제내 전달 파고율, 그리고 방파제 단면 구조의 안정성에 관한 지식 등이다.

방파제 및 기타 해안 구조물의 최적 설계를

위한 체계적인 연구는 1942년 미 육군 공병단의 사석 방파제 단면에 대한 모형실험을 시초로 Hudson(1959), Goda(1969)등에 의하여 연구가 계속되었다. 그러나 80년대 초반에 기존의 연구결과에 따라 설계된 몇몇 방파제에 극심한 파괴가 일어나 기존의 이론적인 설계방식에 문제점이 있음을 인식하고, 방파제 단면의 안정성에 대한 연구와 더불어 피복제의 피해율에 대한 다각적인 연구가 많은 연구자들에 의하여 현재 진행되고 있다. 우리나라 동해안 방파제의 단면구조는 대부분 TTP로 피복한 경사제로 건설되어 있으나 다양한 파랑조건에

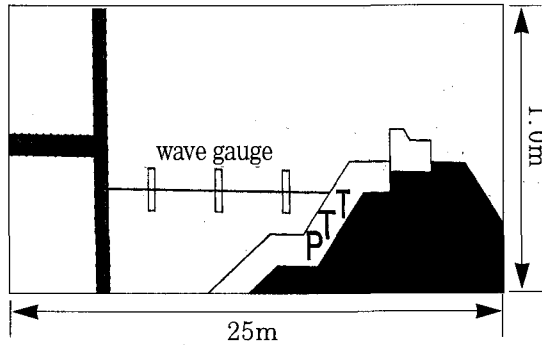
대한 단면의 안정성에 대한 지식이 빈약한 실정이다.

본 연구에서는 강원대학교에 설치된 2차원 조파수조를 이용하여 경사제 전면에 피복된 피복제의 피해를 산정기법을 합리적으로 제시하여 방파제에 대한 효과적인 설계지침을 제공하고자 한다.

연구내용 및 방법

방파제의 수리 모형실험에서 지금까지는 단면의 안정성 여부와 관련되어 여러가지 실험이 행해져 왔으나 파랑조건에 따른 피해율의 산정이 미흡했다.

본 연구에서는 쇄파가 작용할 경우 방파제 전면 피복제에 대한 피해율을 실험적으로 해석하고자 한다. 즉 조파수조에서 재현된 임의의 쇄파하



〈그림-1〉 Configuration of wave generator

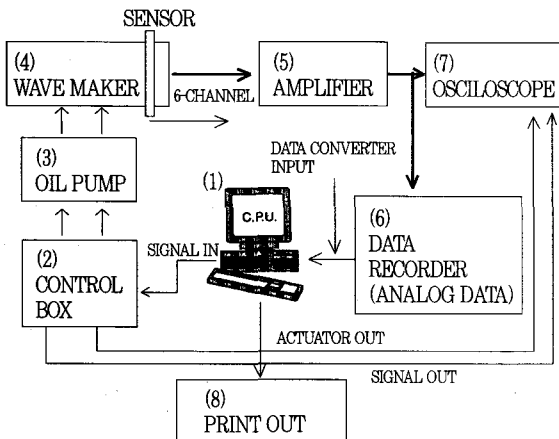
에서 피복제의 파괴형태를 관찰하고 파괴율에 대한 비율을 정량적으로 해석하였다.

실험용 조파수조는 〈그림 1〉과 같이 길이 25.0m, 폭 0.8m 그리고 높이 1.0m인 철제 수조로, 측벽은 관측이 용이하게 두께 12mm의 강화유리가 부착되어 있다. 수조내의 발생가능 최대 파고는 수조내 수심이 80cm에서 30cm이며, 조파 주기는 0.1초에서 10초 범위에서 임의로 선택할 수 있

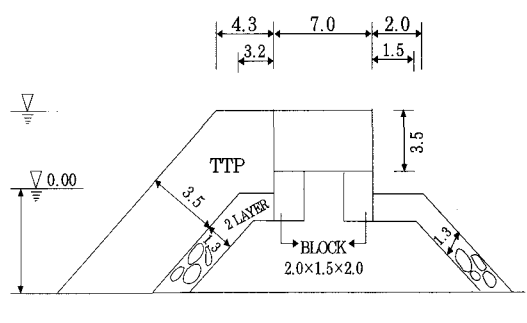
다. 또한 발생시킬 수 있는 파랑은 규칙파 및 불규칙파로 피스톤 형식의 조파판에 의하여 발생된다. 이상의 발생기 구외에도 측정기기로는 파고

계, 압력계 등이 사용된다. 전체적인 조파기 계통도는 〈그림 2〉와 같다.

앞절에서 설명한 조파수조와 측정장비를 가지고 여러가지의 파랑조건에 대하여 〈그림 3〉에 제시된 1/40 축척의 경사제 모형단면에 대하여 TTP의 이동을, 이동방향 등을 관측하였다. 이때 관측이 용이하게 단면을 여러개의 가상격자로 구성하였다. 또한 모형 단면의 설치지점은 수조의 끝단



〈그림-2〉 System of wave generator



〈그림-3〉 Section of breakwater

에 위치하였으며, 전면에 동해안의 자연 해안조건을 적절히 재현하기 위하여 경사 1:20의 수심변화율을 주었다. 쇄파효과를 고려하기 위하여 수심이 변하는 구간상에서 쇄파가 발생하게 하였다. 일반적으로 쇄파시와, 비쇄파시에 TTP 피복체가 받는 에너지의 크기는 다르다. 특히 현재까지 쇄파가 방파제의 전면에서 발생할 때 그 영향이 제일 크다고 제시되어 있다.

이상과 같이 일정경사의 수심변화율을 부여한 상태에서 수조의 끝단에 방파제의 모형 단면을 설치한 후, 방파제의 전면에서 Hudson(1959) 공식에 의하여 산출된 TTP를 피복하면 일단의 모형실험이 준비된다. 따라서 개인용 컴퓨터에 실험하고자 하는 주기와 파고를 입력시켜 일정 시간 동안 TTP 피복체의 이동을 및 이동방향을 수조상부와 전방, 측방에 위치한 관측지점에서 여러명의 관측자가 동시에 측정하여 준비된 측정용지에 기록한다.

실험결과 및 분석

앞에서 설명한 방법에 따라 여러가지의 모형실험을 수행하였다. 처음에 계획된 실험

은 총 48가지 였으나 수조의 크기, 발생 가능파의 범위, TTP 중량의 초과 등 여러가지 이유에 의해 실제 유용한 자료는 총 24개로 계획된 것의 절반을 얻었다.

실제 동해안에서 발생하는 파랑조건을 2차원 수조에서 발생시킨다는 것은 불가능하다. 그러나 이론에 의하여 예측할 수 없는 여러 변수들을

고려하여 해석하기 위하여는 주어진 조건에서 가능한 한 자연 상태와 유사하게 현상을 재현하는 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 기존의 심해 폭풍자료를 입사파랑으로 선택하였다. 이와 같은 자료를 선택한 이유는 여러가지가 있겠으나 본 연구의 주목적이 TTP 피복체의 피해를 산정하므로 추정된 파랑자료가 실제

〈표 1〉 Input Data

T(sec)	H(m)	Structure Slope	T(sec)	H(m)	Structure Slope
10	5.61	1:1.33	14	5.61	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	7.48	1:1.33		7.48	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	9.36	1:1.33		9.36	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	11.23	1:1.33		11.23	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
12	5.61	1:1.33	16	5.61	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	7.48	1:1.33		7.48	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	9.36	1:1.33		9.36	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00
	11.23	1:1.33		11.23	1:1.33
		1:1.50			1:1.50
		1:2.00			1:2.00

보다는 큰 파고로 추정되었기 때문이다. 즉 좀더 안전측의 파랑자료를 이용하여 실험을 하더라도 예기치 못하게 발생하는 현상을 실험실에서 예측하기 위함이다. 계획된 실험 조건은 <표 1>에 나타내었다. 주기는 10~16초까지이며 각 주기에 대하여 각 4개의 파고를 선택하였다. 파고를 여러 가지로 선택한 이유는 파고의

크기가 직접적으로 TTP피복제에 작용하는 에너지와 연관이 있기 때문이다. 쇄파위치는 McCowan(1891)의 정의를 이용하여 파고 및 수심에 따라 구하였다. 각 파고에 여러가지의 구조물 경사를 주었는데 이는 구조물의 경사가 완만할수록 방파제 단면이 안정하다고 제시된 기존의 이론을 확인하기 위함이다. 주기

4개에 대하여 파고 4개, 구조물의 경사 3가지, 총 48가지의 실험조건을 구성하였다.

앞에서 제시된 실험조건을 사용하여 수리모형실험을 수행하였다. 실험은 1993년 10월부터 11월까지 2개월간 강원대학교 토목공학과 수리실험실에서 수행하였다. 언급한 바와같이 주어진 수조의 여건과 여러가지 이유에 의하여

<표 2> Experimental Results

T(sec)	H(m)	Slope	Movement	Rate of movement	Weight(t)
10	5.61	1:1.33	4/107	3.74	16
		1:1.50	2/127	1.57	16
		1:2.00	4/265	1.51	12.5
	7.48	1:1.33	4/72	5.55	32
		1:1.50	0/92	0	32
		1:2.00	3/187	1.60	20
12	5.61	1:1.33	3/107	2.80	16
		1:1.50	1/107	0.79	16
		1:2.00	3/265	1.13	12.5
	7.48	1:1.33	0/72	0	32
		1:1.50	0/92	0	32
		1:2.00	1/187	0.53	20
14	5.61	1:1.33	3/107	2.80	16
		1:1.50	2/127	1.57	16
		1:2.00	4/265	1.51	12.5
	7.48	1:1.33	2/72	2.78	32
		1:1.50	0/92	0	32
		1:2.00	3/187	1.60	20
16	5.61	1:1.33	3/107	2.80	16
		1:1.50	4/127	3.14	16
		1:2.00	3/265	1.13	12.5
	7.48	1:1.33	4/72	5.55	32
		1:1.50	3/92	3.26	32
		1:2.00	4/187	2.14	20

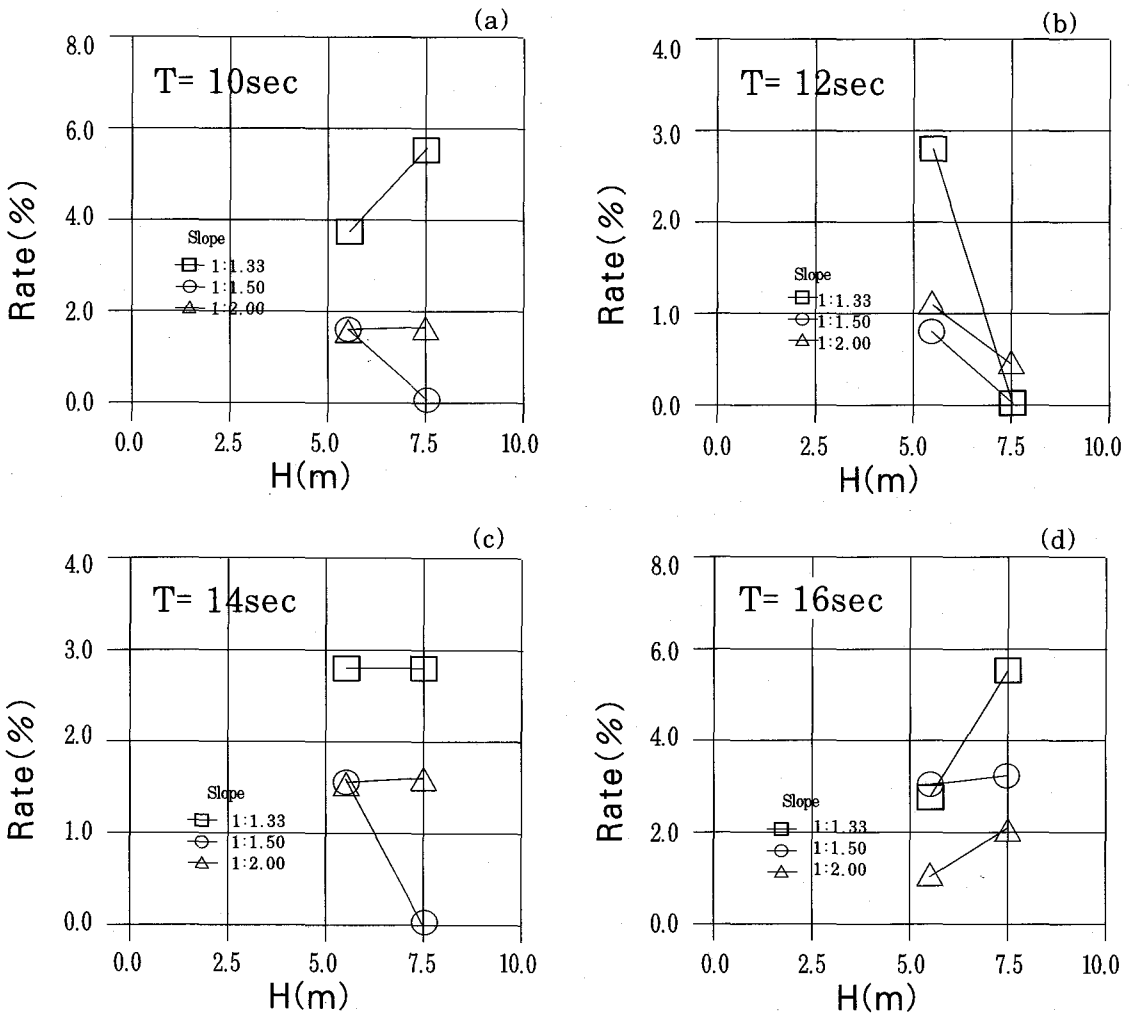
24개의 자료밖에 얻지 못하였다. <표 2>에 그 결과를 제시하였다. 결과를 보면 처음 계획된 자료 중 파고 9.36, 11.23m는 실험실에서 재현하지 못했음을 알 수 있다. <표 2>에서 알 수 있듯이 방파제 단면 전면에 피복된 TTP피복제의 총갯수에 대한 이동 갯수를 넷째열에 나타냈다. 또

한 TTP피복제의 증량은 마지막 열에 나타내었다. 한편 이동방향도 목적을 통하여 관측하였으나 그 정보의 유용성이 의문시되어 제시하지 않았다.

모형실험에 의하여 얻어진 자료 24개를 이용하여 파고와 이동을, 구조물의 경사와 이동을 그리고 주기와 이동율의

관계를 해석하였다. 그에 대한 결과를 <그림 4~6>에 나타내었다.

<그림 4>(a)는 주기 10초인 경우, 일정 구조물 경사에 대하여 파고와 이동율의 관계를 나타낸 것이다. 결과를 보면 경사가 1:1.33인 경우에는 파고가 커짐에 따라 이동율이 크게 증가하고 있음을 알 수



<그림 4> Movement rate of TTP with respect to wave heights

있다. 그러나 경사가 커짐에 따라, 즉 구조물 전면에 피복된 TTP 피복체가 안정 단면을 가지면 파고가 커지더라도 이동율은 크게 변하지 않고 있다. 특히 경사가 1:1.50인 경우에는 예상과는 반대로 파고가 커짐에 따라 이동율이 감소하고 있다. 이와같은 이유를 이론적으로 정확히 규명하기는 어려우나 다음과 같이 생각할 수 있다. 구조물 전면에 피복된 TTP 피복체가 주어진 조건하에서 가장 경제적(전면의 피복체 갯수 관점)이고, 안정된 경사를 가지고 있기 때문이 아닌가 생각된다. 즉 경사가 1:2.00인 경우에는 더 안정된 경사를 갖지만 피복체의 갯수가 많아 상대적으로 파랑에 노출된 피복체가 많기 때문이다. 또한 주기 12초인 <그림 4>(b)에서는 경사 1:1.33인 경우에서 약간 이상한 결과가 나타나고 있다. 파고가 증가함에 따라 이동율이 작아지고 있다.

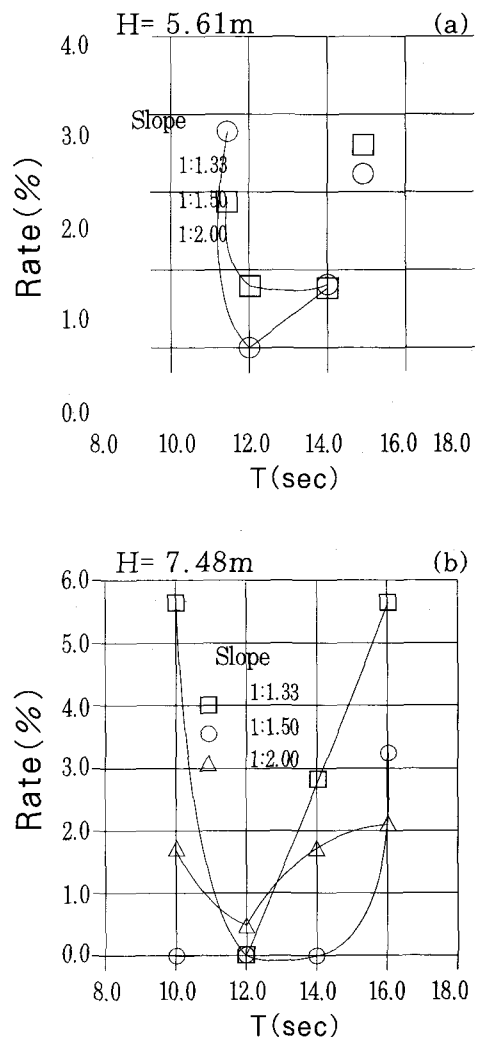
따라서 현재까지 주로 행하여진 모형실험에서는 일정주기에 대하여 단지 파고만 변화시켜 피복체의 안정성 여부를 해석하였으나 주기와도 밀접한 관련을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉, 피복체의 안정성은 단지 파고만의 함수가

아니라 주기와도 연결시켜 주는 어떤 함수관계식이 필요함을 알 수 있다.

그 외의 경사에서는 이동율의 정도가 약간 다를 뿐 <그림 4>(a)와 유사하게 나타나고 있다. 그리고 주기 14초의 <그림 4>(c)에서는 <그림 4>(a), <그림 4>(b)와 유사하게 나타나고 있으나 주기 16초인 <그림 4>(d)에서는 앞의 세 결과와 다른 특징이 나타나고 있다. 경사가 안정하더라도 파고가 커지면 피복체의 이동율이 미소하지만 증가하고 있다. 따라서 TTP 피복체의 이동율, 즉 피해율은 단지 파고의 크기에 따라 선형적으로 비례하지 않고 주기, 구조물의 경사와 상호 복합적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

이상의 관계를 좀더 자세히 연구하기 위하여 <그림 5>(a)와 <그림 5>(b)에 일정파고, 일정 구조물 경사에 대하여 주기와 이동율의 관

계를 나타내었다. 파고 5.61m에 대한 <그림 5>(a)와 파고 7.48m에 대한 <그림 5>(b)에서 매우 관심있는 결과가 나타나고 있다. 즉 주기에 따라 이동율의 크기가 크게 변하나, 어느 특정주기, 12초에서 이동율이 최소가 되

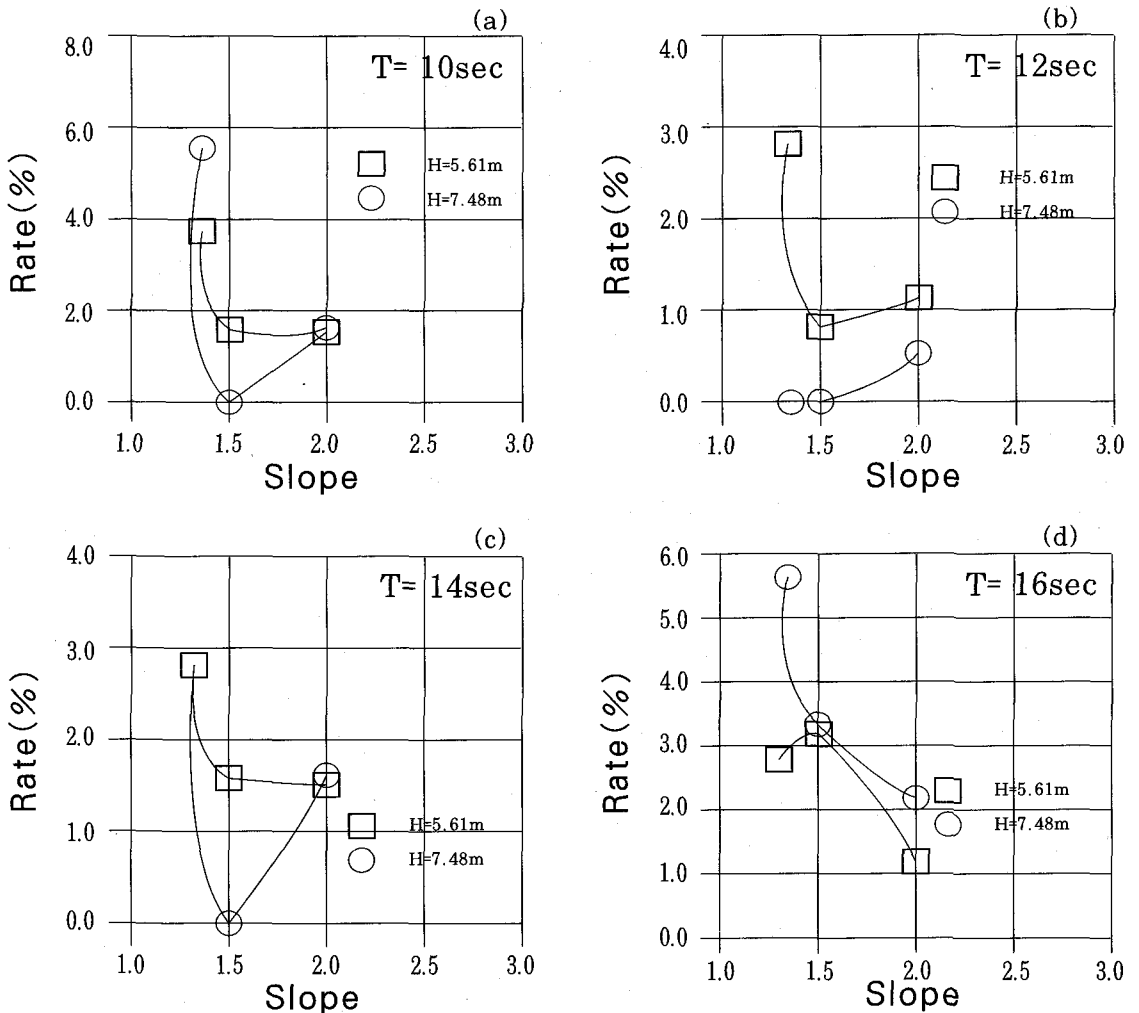


<그림 5> Movement rate of TTP with respect to wave periods

고 있다. 파고와 구조물 경사가 변화더라도 가장 안정한 단면을 주는 주기를 찾을 수 있음을 알 수 있다. 그외의 변수에서는 앞에서 언급한 바와같이 파고가 커짐에 따라, 구조물의 경사가 변함에 따라 피복체의 이동율이 다르게 나타나고 있다. 마지막으로 <그림 6>(a)~(d)에서는 주 변수

를 구조물의 경사로 하여 TTP 피복체의 이동율을 살펴 보았다. 이때 주기와 파고는 일정하게 하였다. 먼저 주기 10초에 대한 <그림 6>(a)를 보면 파고가 작으면 이동율의 변화폭이 상대적으로 파고가 큰 경우보다 작게 나타나고 있다. 또한 일정 파고에 대하여 구조물의 경사가 변하는

경우, 단면이 불안정한 상태에서는 이동율이 크다가 단면이 점차 안정한 상태에서는 이동율이 작게 나타난다. 그러나 단면이 더 안정하여 진다고 해서 이동율이 작아지는 것은 아니다. 이는 파고가 큰 경우에 특히 두드러진다. 본 연구의 결과에 의하면 가장 안정한 단면경사는 1:1.50로



<그림 6> Movement rate of TTP with respect to breakwater slopes

나타났다. 그러므로 경제적이면서도 안정한 단면을 유지하기 위해서는 경사에 대한 민감도 분석도 병행하여야 한다. 주기 12초에 대한 <그림 6>(b), 주기 14초에 대한 <그림 6>(c)에서도 동일한 경향이 나타나고 있다. 그러나 주기 16초에 대한 결과, <그림 6>(d)에서는 파고가 작은 경우에 한하여 반대의 결과가 나타나고 있다.

결론 및 앞으로의 연구과제

여러가지 파랑조건에 대하여 방파제 전면에 피복되는 TTP 피복제의 피해율을 수리 모형실험을 이용하여 연구하였다. 현재까지 이루어진 대부분의 정성적인 연구와는 달리 정량적인 결과를 제시하고자 노력하였다.

총 48가지의 계획 파랑조건 중 본 수조에서 재현가능했던 24가지의 조건에 대하여 얻은 자료를 해석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

일정 주기와 일정 구조물의 경사하에서는 파고가 TTP 피복제의 피해율에 가장 많은 영향을 준다. 그러나 주기와 파고를 동시에 비교하면 피해율은 단지 파고만의 함수가

아니라 주기와도 밀접하게 관련되어 있다. 특히 동일한 파고를 갖는 여러 주기의 파랑 중에서 피복제에 최소 피해를 주는 파랑을 구할 수 있음을 알았다. 구조물의 경사도 피복제의 안정성 뿐만 아니라 경제성에 커다란 영향을 주고 있다. 따라서 현재 주로 사용되고 있는 파고중심의 설계방식을 주기와 구조물의 경사도 함께 고려한 설계방식으로 변화시킬때 보다 안정하면서도 경제적인 단면을 얻을 수 있다고 생각된다.

이상의 결과외에도 본 연구에서 수행하지 못한 방파제 단면형의 변화에 따른 피해율 산정, 피복제의 종류에 따른 피해율, 그리고 본 연구에서 부분적으로 나타난 주기에 의한 영향 등이 더 연구되어야 한다고 생각된다. ㉠

참고문헌

Hudson, R. Y., "Laboratory Investigations of Rubble-Mound Breakwaters," Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 85, No. WW3, 1959.

Goda, Y., "Re-Analysis of Laboratory Data on

Wave Research Transmission over Breakwaters," Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 8, No.3, 1969.

McCowan, J., "On the Solitary Wave," Philosophical Magazine, 5th Series, Vol. 32, No. 194, 1891.