

수리모형실험을 통한 경사 방파제 중간피복블록의 안정성 검토

최 현*, 김규한**, 편종근***, 정공일****

1. 서 론

항만의 대표적인 외곽시설인 방파제는 그 형식상 직립제, 경사제, 혼성제로 구분할 수 있다. 이중 국내의 시공사례가 가장 많은 형식은 사석식 경사제이다. 일반적으로 사석식 경사제는 이형블록, 중간피복석, 그리고 내부사석으로 이루어져 있고, 이형블록의 중량 W 에 대한 중간피복석은 $W/10$, 내부사석은 $W/200$ 이하의 중량비로 시공하는 것이 보통이다(SPM, 1984). 기존의 항만공사에서 중간피복석은 자연석을 이용하여 시공해 왔으나, 항만의 대형화에 따른 설계파의 증가로 이형블록의 소요 중량이 증가하는 추세이며, 이에 따라 중간피복석으로 이용할 자연석의 확보가 용이하지 않은 경우, 중간피복블록을 이용하여 시공하는 사례가 증가하고 있다. 이와 같은 중간피복블록을 선정할 경우에는, 내부 사석의 보호기능, 이형블록의 시공 편의성, 그리고 시공 단계의 위해 노출에 대한 안정성에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 중간피복블록으로 사각블록, 팔각블록, 그리고 국내의 시공사례가 있는 삼각블록을 대상으로 규칙파 및 불규칙파 실험을 수행하여 각각의 블록의 안정성을 검토하고, 안정계수 (K_D)를 상호비교 하였고, 공극률변화에 따른 경사면의 수리특성을 파악하기 위해 모형블록과 공극률판을 이용하여 각각의 공극률에서의 처오름 현상과 반사율의 특성에 대해 상호 비교 분석하였다. 아울러 화상해석법을 이용하여 블록의 이탈 특성을 확인하였다.

2. 이론적 배경

사석식 경사제는 내습파랑의 에너지를 소산시키고, 제체를 보호하기 위하여 중량이 큰 사석으로 피복층을 시공하며, 피복석의 중량은 내습파랑의 조건에 의해 달라진다.

모형실험을 이용한 방파제 피복제의 안정성에 대한 연구는 1930년대 미육군 공병단(US Army Corps)에 의해 처음 시도되었으며, Iribarren(1938)은 사석 사면에서의 안정성에 대한 기초적 개념을 이용하여 파고, 비중, 제체경사 등의 함수로 이루어진 소요중량 산정식을 제안하였다. Hudson(1959)은 여러 가지 단면 형태 및 피복블록에 대한 수많은 실험을 통해 현재 가장 많이 사용되고 있는 Hudson공식을 제안하였다.

* 대영엔지니어링 (명지대학교 대학원 토목공학과 석사과정)

** 관동대학교 건설환경시스템공학부 부교수

*** 명지대학교 SOC공학부 교수

**** 한아 엔지니어링 대표

본 실험에서는 중간 피복 블록의 안정성 검토를 위해 Hudson공식을 이용하여 각각의 블록의 안정계수를 확인하였다.

$$W \geq \frac{\rho_s H^3}{K_D \{ (\rho_s / \rho) - 1 \}^3 \cot \beta} \quad (2.1)$$

여기서 K_D 는 안정계수(stability factor), H 는 입사파고(불규칙파: $H_{1/3}$), W 는 블록의 중량, β 는 사면의 경사, ρ 는 물의 질량, ρ_s 는 블록의 질량이다.

Hudson공식은 파고와 단위체적중량, 그리고 사면경사 만으로 표현되어 그 외의 매개변수(parameter)를 전부 안정계수에 집약하고 있으므로 이형블록의 형상, 거치방법, 쇄파 유·무, 또는 설치장소(두부, 간부)에 따라 각각 다른 안정계수가 이용되고 있다.

안정계수 결정에 필요한 탈락률의 결정은 다음과 식을 이용하였다.

$$D_a(\%) = \frac{(\text{탈락한 블록의 수})}{(\text{사면상의 전피복블록수})} \times 100 \quad (2.2)$$

대수심에 시공된 경사제의 경우 파랑의 영향이 미치는 일정한 수심까지의 피복석 갯수에 대한 이탈 블록수를 탈락률로 취급하는 경우도 있다.

3. 실험조건

3.1 블록의 안정성 실험

본 실험에서는 70cm×150cm×3000cm의 수로에서 2차원 불규칙 조파기를 이용하였으며, 실험장비의 모식도는 Fig. 3.1과 같다. 입사파 신호는 PC상에서 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 목표(target) 스펙트럼으로 하여 제작하였으며, 입사파 검증 실험을 통해, 증폭기의 Gain를 조정하여 입사신호와 입사파랑의 오차를 최소화했다.

안정성 실험에 대해서 규칙파 실험과 불규칙파 실험을 수행하여 결과를 상호 비교하였다. 주기 1.2, 1.5, 2.0초에 대하여 실험을 수행하였고, 입사파고는 탈락률이 0에서 5%이상까지 증가하도록, 파고를 점진적으로 증가시켜 실험을 수행하였다.

실험에 사용한 모형블록의 제원은 표 3.1와 같다.

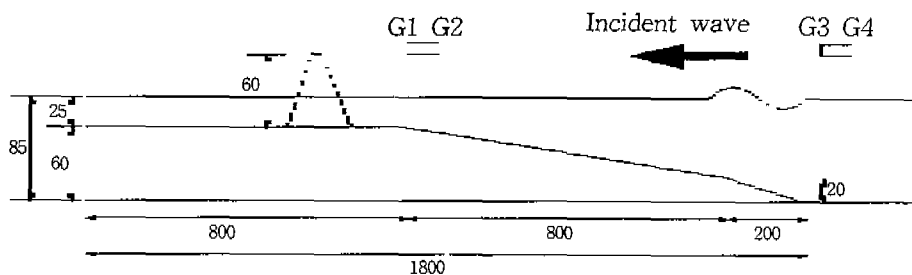


Fig. 3.1 실험 장비의 모식도(단위:cm)

표 3.1 모형블록의 제원

블록	사각블록	팔각블록	삼각블록 (B)	삼각블록 (A)
모형블록				
공극률	5%이하	22%	28%	40%
중량(g)	123.9	100.5	119	119
단위피복면적(cm^2)	28.3	28.3	30.6	34.7
단위중량(g/cm^3)	2.3	2.3	2.3	2.3

표 3.2 공극률판의 제원

공극률 (%)	a(cm)	b(cm)	셀의모양 (D=1cm)
15	2.2	2.4	
20	2.2	1.8	
25	1.7	1.85	
30	1.6	1.65	
35	1.5	1.5	
40	1.4	1.4	

3.2 수리특성 실험

수리특성 실험에서는 모형블록과 함께 일정한 경사면 공극률을 유지하기 위해 공극률판을 제작하였다. 공극률판은 각각 15, 20, 25, 30, 35, 40%의 공극률을 이루고 있다. 공극률판은 일정한 공극률을 유지하기 위하여 기본 단위인 셀을 기준으로 직경 1cm의 구멍을 천공하여 제작하였고, 각각의 공극률판의 셀의 크기는 Table 3.2와 같다.

실험조건은 실험결과와의 상호비교를 위해 규칙과 실험을 수행하였고, 반사파에 의한 영향을 최소화 하기위해 반사파가 조파판에 대한 1차 반사가 일어나 다시 단면에 입사하기 전에 실험을 중지하여 처오름 높이 (R)와 반사율 (K_R)을 측정하였다. 처오름 높이는 화상해석법을 이용하여 관측하였다. 입사파 주기는 1.2, 1.5, 2.0초로 하였고, 파고(H)는 실험수행 중 블록의 움직임이나 이탈에 의해 처오름 현상 및 반사율에 영향을 최소화하기 위해 비교적 낮은 파고인 5, 7cm를 이용하여 실험을 수행하였다.

3.3 피해기구 파악 실험

블록의 피해기구(damage mechanism)의 파악은 고성능 디지털 비디오 카메라를 이용하여 안정성 실험 및 수리특성 파악 실험 과정에서 확인된 이탈이 가장 많이 발생하는 평균수면 아래의 블록을 이용하였다. 주기 1.2, 1.5, 2.0초의 규칙파를 이용하여 이탈이 발생하는 파고에서 촬영하여 일정한 시간간격으로 촬영화면을 편집하여 블록의 이탈 경향을 파악하였다.

4. 실험 결과

4.1 안정성 실험 결과

각각의 실험 결과를 정리하면 표 4.1과 같다. 공극률이 가장 크고, 단위피복면적이 가장 넓은 삼각블록(A형)의 안정계수가 가장 크게 나타나며, 공극률이 가장 작은 사각블록은 중량이 가장 큰에도 불구하고 안정계수가 가장 작게 나타났다. 각각의 실험의 결과는 Fig. 4.1과 같다.

표 4.1 안정성 실험 결과(탈락률 5%기준)

블록		사각블록	팔각블록	삼각블록 (B형)	삼각블록 (A형)
안정 계수	규칙과	3-4	4-5	9-10	18-19
	불규칙과	2-3	4	6-7	8-9

본 실험에서 알수 있듯이 삼각블록은 공극률 40%로 설치시 안정계수가 매우 양호함이 확인되었다.

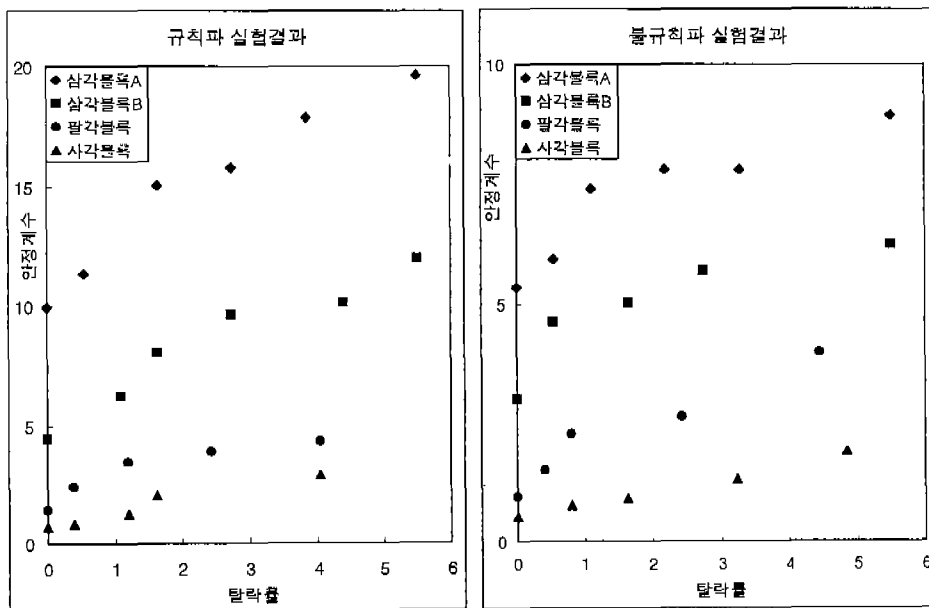


Fig. 4.1 안정성 실험결과

4.2 단면의 수리특성과악

단면에서의 반사율(K_R)과 상대 처오름 높이(R/H)을 각각의 주기에 대하여 정리한 것은 Fig. 4.2와 같다. 상대 처오름 높이의 비교에서 공극률판을 이용한 경우의 실험에서 모형블록을 이용한 실험보다 값이 조금 큰 것은 공극률판이 모형블록에 비해, 조도계수가 작은 이유라 사료된다. 실험 결과를 비교해 보면, 각각의 주기에 대하여 공극률 25~30% 범위에 이르기까지 상대 처오름 높이의 감소 경향이 뚜렷하지만, 이 범위 이상의 공극률에서는 상대 처오름 높이의 감소율이 작아짐을 알 수 있다.

단면의 반사율은 전반적으로 모형블록의 실험결과가 공극률판의 실험결과보다 큰 것을 알 수 있다. 하지만, 각각의 실험 결과에서 공극률의 변화에 대한 반사율 감소는 일정한 경향을 보이고 있으며, 공극률 25% 전·후에서 반사율의 감소비율이 작아짐을 알 수 있다.

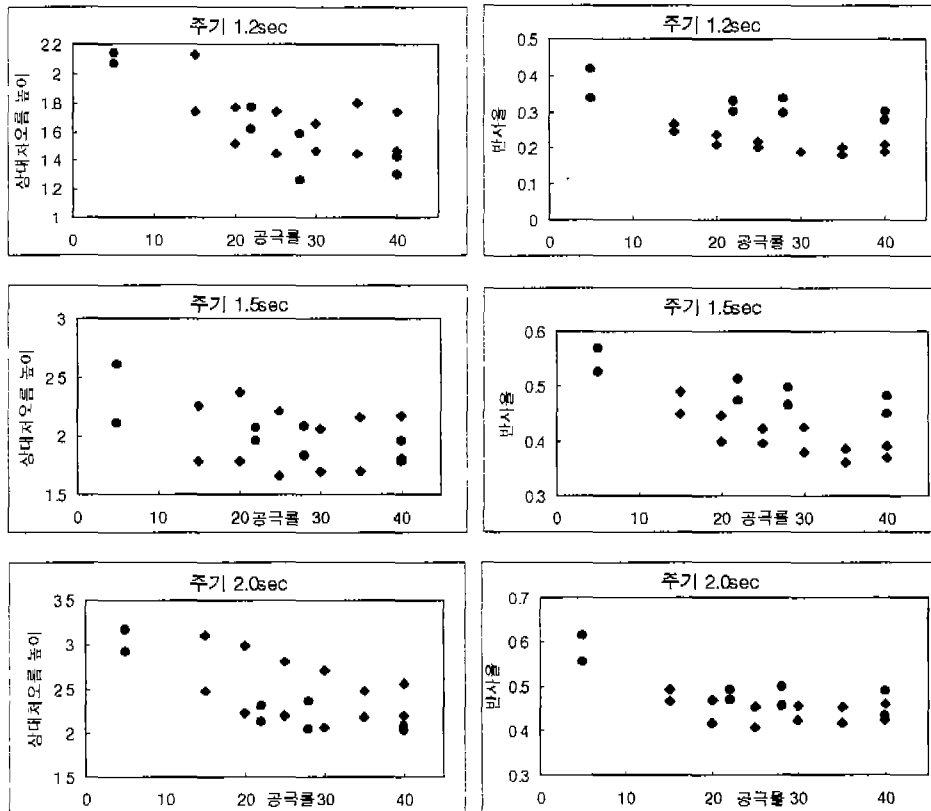


Fig. 4.2 공극률 변화에 따른 상대저오름높이 및 반사율의 변화(●:모형블록, ◆:공극률판)

4.3 블록의 이탈특성

화상해석법을 이용하여 모형블록의 동적거동을 해석하였다. 모형블록은 대부분의 경우 처내림(down-wash)의 수위가 평균수위 이하로 내려가면서 이탈이 발생하기 시작함이 확인되었다. 처내림시 블록이 움직이기 시작하고, 블록 상호간의 결합력이 약화되면서 사면에 대한 수직방향으로 움직이기 시작한다. 동일한 입사파 조건하에서 공극률이 가장 작은 사각블록에서 가장 먼저 움직임이 발생한다. Fig. 4.3 a, b, c,에서처럼 처내림과 함께 블록의 움직임도 사면 아래쪽을 따라 전파되고, 움직임이 가장 큰 순간은 처내림이 멈추기 직전(Fig. 4.3 c)이다. 다시 처오름 발생시(Fig. 4.3 d) 블록은 사면의 움직임을 멈추고 다시 안정을 찾는다. 이러한 현상이 반복되면 블록의 움직임은 점점 커지다가 이탈이 발생한다.

이탈 경향은 대부분 Fig. 4.4에서 보이는 것처럼 시계방향으로 전도되는 현상을 보인다. 움직임이 가장 큰 블록은 주변블록과의 결합력을 상실하고 전도되며, 한번 이탈이 발생한 블록은 처오름에 의해 다시 제자리를 확보하는 경우는 매우 희박하며, 대부분 완전한 탈락으로 이어진다.

5. 결론

본 실험을 통하여 중간피복블록으로서의 삼각블록의 안정성이 확인되었으며, 공극률의 변화에 따른 사면상의 수리특성의 비교를 통해 공극률의 추천범위를 제안할 수 있다. 아울러 화상해석을 이용하여 파랑의 처오름과 처내림 순간 블록의 동적거동을 해석하고 블록의 이탈특성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

Hughes S. A., Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, World Scientific, 1993.

Osamu Toyoshima, Gentle Slope Seawalls Covered With Armour Units, Coastal Engineering, 1988, pp1983-1996

范 期錦, 渡辺 晃, 堀川青何, 不規則波に對する消波ブロック傾斜堤の安定性に關する實驗的研究, 第30回 海岸工學講演會論文集, 1983, pp.352-356

谷本勝利, 原中佑人, 山岡一雄, 不規則波に對する消波ブロック被害率の變動性, 第30回 海岸工學講演會論文集, 1985, pp.480-484

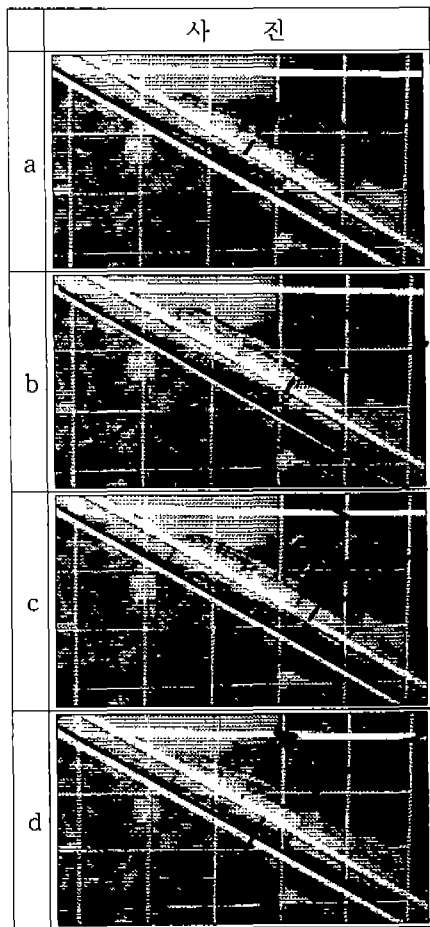


Fig. 4.3 블록의 흔들림 현상

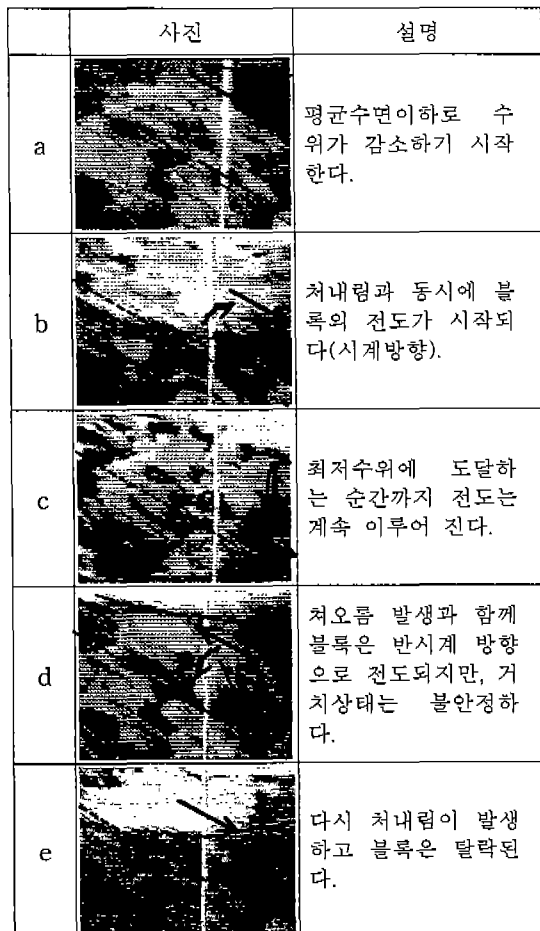


Fig. 4.4 블록의 이탈경향