

사석제의 건설 공정설계를 위한 수리학적 특성에 관한 연구

김홍진 류청로 김헌태

A study on hydrodynamic characteristics for construction progress of rubble mound breakwaters

Hong-Jin Kim, Cheong-Ro Ryu, Heon-Tae Kim

Key Word : Stability(안정성), Progress(공정), Rubble mound breakwater(사석제), Failure rate(파괴율)

ABSTRACT

The Sectional and Spatial failure modes are discussed using the experimental data with long crest wave and multi-directional waves considering the failure modes occurring around the rubble-mound breakwater. The spatial & sectional stability and failure mode around the rubble-mound structures with construction progress can be summarized as follows:

- 1) The rubble mound structures at basic construction step was occurred serious failures when ξ was about 6.5.
- 2) It was clarified that the failure modes at the round head of a detached breakwater are classified as failure by plunging breaker on the slope, failure by direct incident wave force and failure by scouring at the toe of the detached breakwater.
- 3) The failure mode was found in the lower wave height than the design wave by the breaker depth effects.
- 4) The failure on the slope were also developed at the lee side of the round head because diffracted wave propagated into the behind area by grouping effect of multi-directional irregular wave.

1. 서 론

해역에 대한 다양한 이용욕구는 해역이용기술의 발달을 가져왔으며, 이러한 해역이용기술의 대표적인 기초시설로서 외해로부터 입사하는 파랑의 에너지를 조절하기 위해 설치하는 방파제가 있다.

이러한 해역이용의 정온도를 확보하기 위한 소파구조물의 설계를 위해서는 외력조건으로 설계파랑을 산정하게 된다. 이렇게 결정된 설계 파랑은 구조물의 완성단면에 대한 안정성 및 기능성의 검토가 기존의 주된 연구방법이었다. 그러나 일반적으로 해양구조물의 건설기간은 해양구조물의 건설 특성상 해상의 제반조건에 따라 작업일수에 영향을 주는 제반인자로 인해 육상의 건설기간보다 더욱 많은 공사기간이 소요된다. 이러한 공사기간의 증가는 구조물 및 공사조건설상 최적의 조건을 고려하더라도 변경할 수 없는

한계가 있으므로 건설공정상의 구조물의 안정성은 더욱 위협하다.

우리나라와 같이 폭풍, 태풍 그리고 지진과 같은 특이 기상현상의 발생이 빈번한 경우 건설기간동안의 제체의 안정성 확보는 중요한 설계요소가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 경사제에 대한 건설공정설계를 위한 기초자료로서 각 공정 단계별 수리학적 안정성을 검토하여 기존의 완성단면에 대한 안정성과 비교하였다.

이러한 사석구조물의 안정성에 관한 연구는 초기의 Iribaren(1938), Hudson(1959), Heder(1960), Losada & Gimenez-Curto(1979) 그리고, Ahrens(1975)의 연구를 통해 논의되었다. 규칙파랑을 대상으로한 이들 결과를 대표한 설계식으로 Hudson의 식(SPM, 1984)을 범용적으로 사용하여 왔다. 한편, Tompson & Shuttler(1975)는 불규칙파에 대한 사석의 안정성을 연구했고, 이는 사석방파제를 대상으로한 최초의 불규칙파 실험이었다. 그리고, 불규칙파에서 주기성을 고려한 Ryu & Sawaragi(1986),

Van der Meer(1987) 등의 단면 실험이후에, 3차원 평면수조에서 공간적인 안정성 및 축척효과에 대한 논의가 지속되었다. 방향성파에 대한 몇 가지 피복석의 안정성이 연구되었고(Galland, 1994), 불규칙파의 실험을 통한 스펙트럼형상 및 파군특성의 영향을 고려한 새로운 설계식이 제안되었다(Ryu & Kim, 1994). 그리고, 다방향 불규칙파에 의한 사석방파제 제두부의 안정성에 대한 연구도 진행되었다(Matsumi et al., 1994).

2. 본 론

2.1 해양구조물의 건설공정

일반적인 해양구조물의 공정관리는 시공계획에 있어서 품질, 원가 안정 등 공사관리를 목적으로 하는 요건을 종합적으로 조정하여 책정된 기본공정 계획을 바탕으로 실시되는 것이다. 이것은 공사의 시공단계를 평가, 측정하는 기준을 시간에 두고 노동력, 기계설비, 자재 등의 생산요소를 가장 효과적으로 활용할 것을 목적으로 한 관리이다.

공정관리는 공사의 진척관리로서 시공계획의 입안, 계획을 시공면에서 실시하는 통제기능과 시동도중에서 계획과 실적을 평가, 개선점이 있다면 처리를 하는 개선기능으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 기존의 공정관리개념은 시공상의 제반 기술, 장비, 인력의 운용 및 경제적인 요소의 관리가 주된 설계변수였다. 허나 고파랑의 내습과 같은 급격한 외력조건에 따른 건설 중 제체의 안정성에 대한 대책은 미약하다. 따라서 각 건설공정에 대한 단면의 안정성에 대한 검토가 필요할 것이다.

2.2 건설공정에 따른 대표단면

경사제의 건설은 일반적으로 크게 세 단계로 구분할 수 있다. 먼저 지중부 공사, 수중부 공사, 수상부 공사로 나뉘며 구성재료에 따라 기초사석부, 피복석,

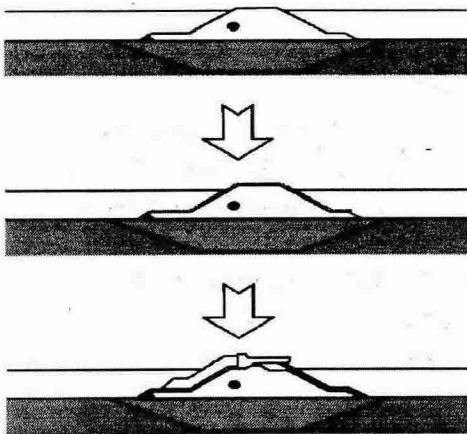


Fig. 1. Schematic diagram of construction progress.

피복블록, 상치콘크리트 부로 구성되어있다. 건설공정은 시공성을 고려하여 약간의 차이는 있으나 Fig. 1과 같은 순서로 건설공정을 결정하게 된다. 본 연구에서는 경사제의 건설공정설계를 위한 기초자료로서 단면 및 평면에 대한 단면적으로 기존의 완성단면에 대한 안정성 및 시공공정을 구분하여 각 단계에서의 제체의 안정성을 검토하고 평면적으로 곡면제체 혹은 제두부에서의 파괴모드를 검토하고자 한다.

2.3 시공중 단면의 안정성 실험

전 절에서 설명한 공정상의 대표단면을 이용하여 각 단면에서의 수리학적인 안정성을 검토하였다.

실험은 부경대학교 해양수리실험소 내에 설치된 2차원 불규칙파랑 조파수조에서 실시하였다. 본 연구의 실험조건은 Table 1과 같다.

실험의 상대수심의 범위는 0.3에서 1.8사이의 조건으로 구성하였으며, 입사파랑의 조건은 설계파랑조건에서 평상파랑까지 포함할 수 있는 범위를 적용하였다. 불규칙파랑의 조파를 위해서 사용된 목표스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 이용하였다. 파랑의 검출시간은 1000파이상의 파랑을 검출하여 통계처리하였다. 추출간격은 0.05 sec이며, 구조물의 조건은 core 사석을 이용한 기초 단면과 중간피복석을 피복한 단면을 주요 실험단면으로 결정하였다.

일반적인 사석구조물의 안정성 실험은 SPM(CERC, 1984)에서 제시한 안정성 평가방법인 대상영역에 대한 파괴된 영역의 비를 이용하여 안정성을 평가한다. 허나 본실험의 경우 내부 피복석 및 core 사석으로 구성된 단순 단면에 대한 안정성을 평가하여야 하므로 일반적인 평가기준을 적용하기 어렵다. 따라서 안정성 평가의 일반적인 기준이 되는 파괴율의 정의를 다음과 같이 결정하였다.

일반적으로 파괴라 함은 대상 매질이나 구조물이 초

Table 1. Experimental conditions

Relative depth	0.3 ~ 1.8
Wave steepness	0.01 ~ 0.046
Structures	only core riprap middle layer armored
Wave number	over 1000
Collect interval	0.05 sec
Irregularity	Irregular wave (non breaking)
Target spectrum	JONSWAP

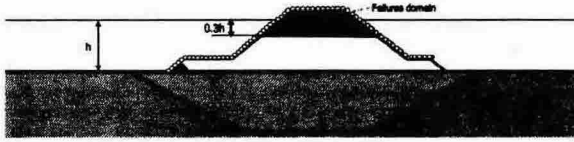


Fig. 2. Definition of the failure and the failure Domain.

기의 역할을 수행할 수 없는 상태를 말한다. 본 연구에서의 파괴는 피복석의 파괴기준을 정하는 것이고, 피복석은 이안제 제 두부로 입사하는 파랑에 대해 자중과 피복석간의 마찰력으로 저항하게 되므로 파괴는 중력과 결집력으로 외력에 저항하는 피복석이 초기 위치를 벗어남으로써 피복석의 기능을 상실하였다고 생각하고, 이러한 상태를 파괴로 정의한다. 파괴율에 대한 정의는 Shore Protection Manual(CERC, 1984)에서 제시한 대상 영역내의 초기 피복석 수에 대한 이동한 피복석의 수라는 정의를 기본적으로 따른다.

$$D = \frac{\text{Number of stones removed}}{\text{Number of stones with in active zone}} \times 100 \quad (6)$$

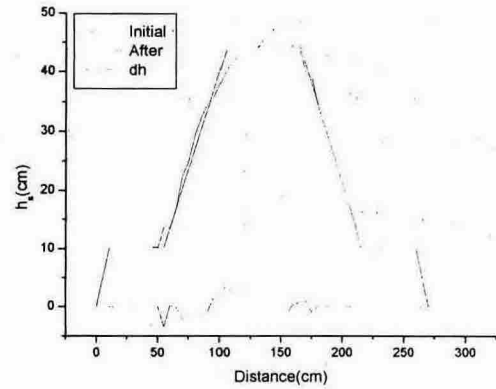
본 실험에서는 기초구조물의 파괴 시 정량적인 파괴율을 제시하기 위해 정수면으로부터 전체수심의 30%가 되는 단면, 즉 본 실험이 비쇄파 파랑의 조건임을 생각할 때 전체수심의 30% 이내에 파고가 분포하게 되고 따라서 입사하는 파랑에너지의 주요 작용영역은 제체의 정수면으로부터의 30% 수심까지 일 것이다.

Fig. 2에서 파괴의 대상 영역을 결정하고 해당영역내에서의 제체의 거동을 이용하여 제체의 파괴율을 평가하였다. 입사파랑의 방향을 x축으로 하여 5cm 간격으로 지형변화를 사면계(KENEK)를 이용하여 계측하여 파괴의 범위를 계측하였다.

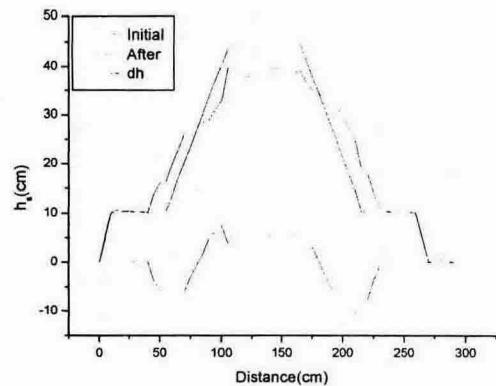
Fig. 4은 조파수조내에 설치한 구조물의 모습을 나타내고 있으며 구조물의 설치영역은 2차원 조파수조내의 유효영역 내에 설치하였으며 조파기는 피스톤형 조파기이다.

2.4. 시공대표단면에서의 단면 안정성

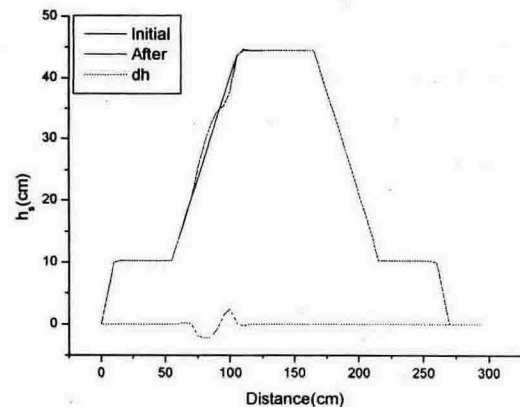
단면 실험을 통해서 시공단면에서의 안정성을 평가하였다.



a) core riprap($H_{1/3}/h = 0.055$, $kh = 1.647$)



b) core riprap($H_{1/3}/h = 0.153$, $kh = 0.412$)



c) middle layer armored($H_{1/3}/h = 0.066$, $kh = 1.421$)

Fig. 3 Distribution of Failure on the structures.



Fig. 4. Experimental setup.

Fig. 4는 시공중인 단면에 여러 가지 파랑이 입사할 경우 단면의 파괴형상을 나타내고 있다. 총 23개의 Case 중 대표적인 결과를 나타내었다. 그림에서 최초의 단면형상과 입사파랑의 내습 후 단면의 형상을 나타내고 있으며, 하단의 값은 각 x좌표 위치에서의 피해량을 나타내고 있다 양의 값은 파괴되어 침식된 단면을 나타내며, 음의 값은 기존의 단면위에 퇴적되어 평형단면을 형성한 경우이다.

그림의 a)와 b)는 내부사석으로 구성된 단면조건이며, a)는 입사파랑의 에너지가 비교적 작은 경우, b)는 주기와 파고가 비교적 큰 폭풍파랑조건이다. 단면의 파괴형상은 최초 파랑이 직접 입사하는 정수면부와 상부가 피해를 입었으나 고파랑의 내습 시 단면 자체가 붕괴되어 심각한 단면손실을 보였다. a)의 경우와 유사한 파랑조건에 대해서 내부피복석을 피복한 경우의 실험 후 단면은 a)의 경우에 비해 피해정도가 적었다. 허나 내부피복석의 설치이후에 고파랑이 입사하는 경우에는 초기 내부피복석의 파괴이후 파괴된 영역을 중심으로 내부의 core 사석이 유출되게 되며 이는 구조물 자체의 붕괴를 가져온다.

Fig. 5는 상대수심에 따른 파괴율의 변화를 보인다. 그림에서 실선은 2차 다항근사한 회귀곡선이며 곡선을 통해서 파괴율은 상대수심에 대해 1.2 부근에서 최소가 되며 전체적으로 상대수심이 크거나 적을 때에는 파괴가 비교적 크게 일어났다. 이러한 결과는 내부피복석 피복 단면과 core 사석 단면 모두에서 나타났으며, 이는 입사하는 파랑이 장주기일 때 피복석의 피해가 증가한다. 파랑의 주기가 비교적 적으나 파괴율이 증가하는 것은 core 사석의 경우 자중이 적으므로 주기는 짧으나 상대적인 파랑의 영향으로 파괴율이 증가한다.

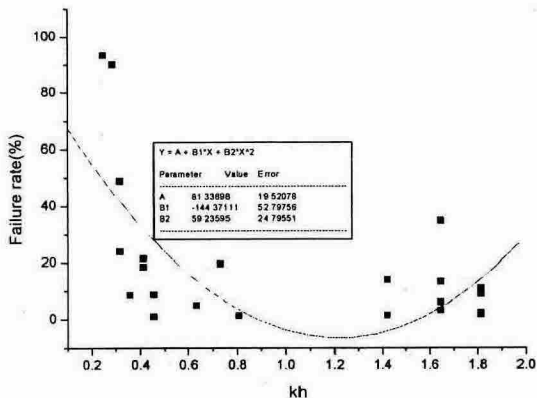
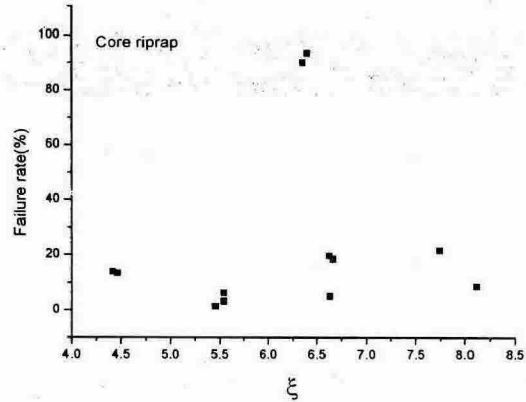
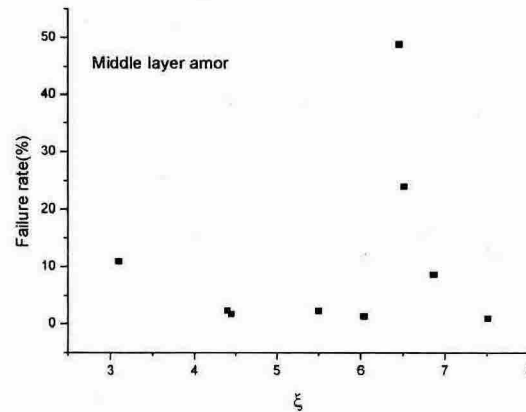


Fig. 5. Variation of Failure rate with relative depth.



a) core riprap



b) middle layer armor

Fig. 6. Failure mode with incident wave & shape of structures.

Fig. 6은 구조물의 형상과 입사파랑조건에 따른 파괴율의 변화를 보이고 있다. 실험영역내의 중간 값인 6에 7사이에 거의 완파의 현상을 보인다. 이는 비교적 장주기인 파랑의 내습으로 인한 피해가 큰 것을 나타내며, 주기가 더욱 증가할 경우 파형경사가 감소하여 구조물의 파괴율은 감소한다. core 사석의 경우 ξ 가 6.3의 정도에서 가장 취약함을 보이며, 내부피복석으로 피복된 공사단면의 경우 ξ 가 6.6 정도에서 가장 높은 파괴율은 나타내었다.

2.5 시공 중인 경사제의 평면 안정성

경사제에서의 제두부 혹은 곡면부에서의 안정성을 파악하기 위해서 평면실험을 실시하였다. 실험조건은 완성단면이며 완성단면에서의 공간적인 파괴모드 해석을 통해서 공사 시 단면의 취약성을 평가하고자 한다.

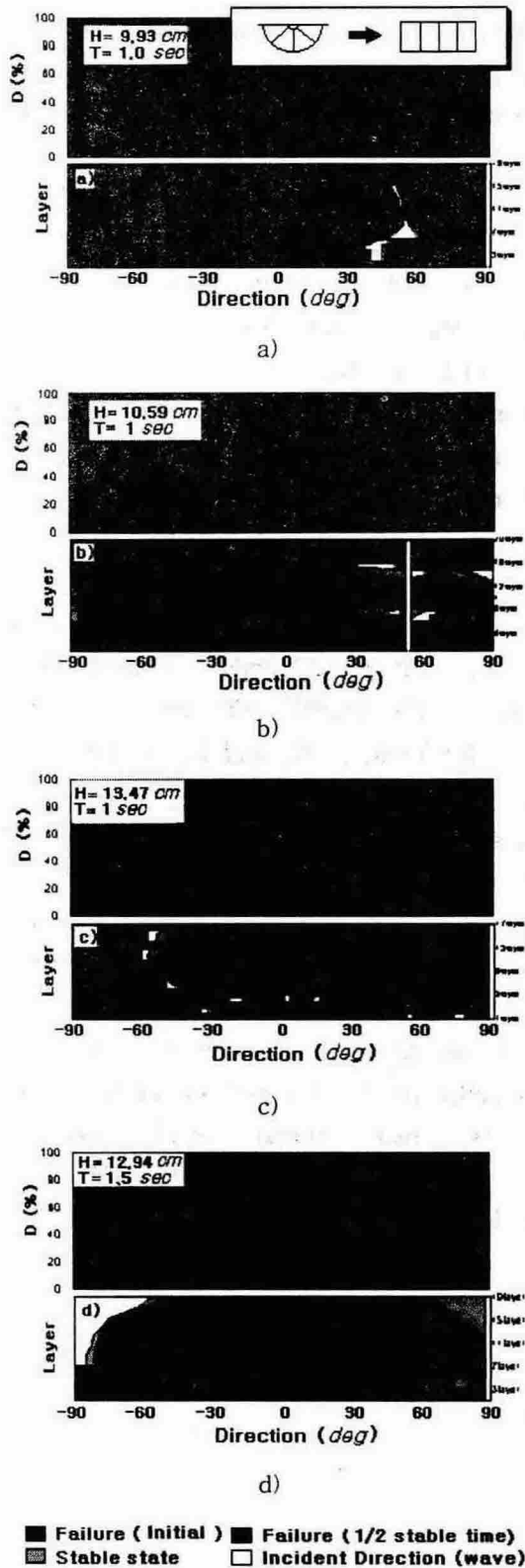


Fig. 7. Spatial characteristics of the failure and failure rate.

제두부에서 측정된 파괴율의 표현을 위해 반원형의 곡면 제두부를 직각좌표화 하였다. Fig. 7의 상단 그림과 같이, 기부 하단을 중심으로 비례적으로 각

단의 길이를 늘여 α 를 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위를 가지는 직각좌표축을 구성하였다.

제두부의 파괴는 파고, 주기, 입사 파향 그리고, 파수를 지배적인 변수로 가진다. Fig. 7에서는 파향, 파고, 그리고, 주기에 따른 파괴-공간적인 분포를 알 수 있다. 각 그래프에서 상단의 그림은 각 방향별 (α) 파괴율 (D)을 나타내고, 하단의 그림은 제두부를 직각좌표화 한 피복석의 파괴분포 그림이다. 그림 내에서 격자를 이루고 있는 영역은 파괴가 일어나지 않은 영역이고, 격자가 없는 폐곡선 부분은 파괴된 영역이다. 그리고, 이 폐곡선내의 점층적으로 짙어지는 폐곡선들은 파괴가 진행 될 때의 같은 시간에 대한 파괴영역이다. 가장 진한색부터 초기파괴이며 점점 짙어지면서 파괴의 발달을 나타낸다. 파괴율의 계산을 위해서 실험은 안정화된 평형단면에서의 파괴를 계산하였기 때문에 파괴의 규모만 알 수 있었고, 파수(시간)에 따른 파괴모드의 발달 특성을 파악하는 것은 어렵다. 따라서 8 mm video camera로 촬영된 화상을 캡춰하여 해석하고, 목측한 관측야장을 비교하여 평형단면에 이르는 시간을 10단계로 나누어 등 시간에 대한 파괴영역선을 그려 전체 파괴영역에 대한 시·공간적인 파괴 및 발달을 그림에서 표현하였다. 격자내의 흰색 세로선은 입사하는 파향을 나타내며, 입사하는 파향과 파괴위치의 관계를 잘 알 수가 있다. Fig. 7에서는 여러 입사하는 파랑조건에 따른 피복석의 파괴모드를 확인할 수 있다. a)에서 제두부에 수직으로 입사하는 파고보다 b)에서는 입사파향에 따라 파괴의 위치와 같지만 파고 값이 다른 경우이다. 따라서 파괴영역이 입사하는 방향으로 확대된 것을 볼 수가 있고, 입·반사하는 파력에 직접적인 파괴와 사면상의 쇄파에 의한 파괴영역이 비슷한 곳에서 시작되는 것을 알 수가 있다. a)와 b)의 그림에서 보듯이 입사파향에 따른 입·반사파 영역과 사면상의 쇄파영역을 구분 할 수 있고, 피해영역의 차이도 살펴볼 수가 있다. b)와 d)의 그림에서 주기가 길어지면 사면상의 쇄파에 의한 파괴가 강해지고, 초기 파괴위치 또한 배후로 이동하며, 집중되는 모습을 볼 수 있다. 파형경사가 안정적인 경우에는 중복파에 의한 파괴와 사면상의 규모가 다른 것을 알 수 있다. 주기효과도 장주기 조건에서 사면상의 쇄파가 더욱 발달하고 배후면까지 영향을 미치는 것을 c)와 d)의 그림을 비교하여 알 수 있다. a)와 c)의 그림은 같은 파향과 주기가 쇄파에 의한 파괴가 함께 발달하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 파형경사와 파향에 의해서 제두부의 파괴와 발달이 달라지는 파괴모드를 알 수 있고, 파고는 전면 입·반사파 영역과 사면상의 쇄파에 영향을 미치며, 주기의 변화는 사면 중앙의 피복석과 배후면의 기부세굴의 발달에 영향을 미친

다. 파향은 제두부에서의 전체적인 파괴분포를 제체부의 형상적인 효과와 조합되어 공간적으로 이동하는 현상을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 경사제의 시공중 고파랑의 내습에 따른 제체의 안정성을 검토하고, 제두부의 평면 파괴모드를 확인함으로써 시공중인 경사제의 공간적인 안정성을 평가하고자 하였다. 연구를 통한 결과는 다음과 같다.

1. 경사제의 시공상 core 사석의 설치공정의 경우 파랑에 취약함을 보이고 있으며 ξ 가 6.3 부근에서 가장 심각한 피복석의 파괴를 보였다.
2. 내부피복석을 피복한 경우 초기파괴의 발생은 저항하지만 초기파괴의 발생시 내부의 core 사석의 유출로 제체자체의 안정성에 심각한 문제를 가지고 온다.
3. 경사제 제두부에서의 초기파괴는 입사하는 파향과 주기에 지배적이며 고파랑의 입사로 인한 사면상의 쇄파와 반사파의 발생은 피복석의 파괴를 증가시킨다.

참 고 문 헌

- 1) Iribarren, R. C., "A formular for the caculation of rock-fill dikes", Revista de Obras Publicas, Madrid. 1938
- 2) Losada, M. A. and L. A. Gimenez-Curto, "The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number", Coastal Eng. Vol.3, pp.77-96, 1979

- 3) Ryu, C. R. and T. Sawaragi, "A new design method of rubble mound structures", Proc. 20th ICCE, ASCE, pp.2188-2202, 1986
- 4) Saito, E. and T. Shibayama, "Local Scour around a Large Circular Cylinder on the Uniform Bottom Slope due to Waves Currents", Coastal Eng., Vol.21, No.4, pp.2799-2810, 1992
- 5) Tompson, D. M. and R. M. Shuttler, "Riprap design for wind wave attack. A laboratory study in random waves", Willingford, EX 707, 1975
- 6) Toue, T., H. Katsui and K. Nadaoka, "Mechanism of Sediment Transport around a Large Circular Cylinder", Coastal Eng., Vol.2, No.219, pp.2867-2878, 1992
- 7) Van der Meer, J. W. and K. W. Pilarczyk, "Stability of rubble mound slopes under random wave attack", Proc. 19th Coastal Eng. Conf., Huston, pp.2620-2634, 1984
- 8) Van der Meer, J. W., "Rock slopes and Gravel Beaches under wave attack", Doctorial Thesis Delft Univ., pp.11-92, 1988
- 9) Van der Meer, J. W. and J. J. Vedman, "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport", Coastal Eng., Vol.17, pp.153-171, 1992
- 10) 横木 亨 著, 金南亨 譯, "漂砂와 海岸侵蝕", 淸文閣, pp.37-76, 1996
- 11) 김상훈, 이익효, "港灣工事施工實務便覽", 新技術, 2000