

항로 주변의 사석경사제 제두부의 수리학적 특성 연구

김홍진 · 류청로 · 강윤구

Hydraulic stability at the head of rubble mound breakwater around the entrance harbour

Hong-Jin Kim · Cheong-Ro Ryu · Yoon-Gu Kang

Key Word : Stability(안정성), Sea route(항로), Directional Wave(방향성파), Rubble mound breakwater(방파제)

ABSTRACT

The failure at the head section of rubble mound breakwaters is more important than other failure modes. because this initial failures will occur the failure of the trunk section and lead to the instability of the structure.

The three-dimensional failure modes are discussed using the experimental data with multi-directional waves considering the failure modes. It was occurred by the topographical characteristics around the head of rubble mound breakwater. The spacial characteristics of failure mode around the rubble-mound structures can be summarized as follows:

- 1) 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 at the rubble mound breakwaters.
- 2) The failure mode was found in the lower wave height than the design wave by the breaker depth effects and topography around structures. It is clarified that the structure was monitored safely designed for the design wave but the failure was occurred by the reason of breaker waves.

1. 서 론

지속적이고 다양한 해양개발에 대한 관심의 증대는 해안공간을 이용하는 이용자의 다양한 욕구를 발생시켰으며, 그러한 다양한 욕구는 해안구조물의 발달을 가져왔다. 허나 해안구조물의 최외곽에서 해안의 보호를 위해 설계되는 방파제의 경우 다양한 욕구보다는 기존의 일반적인 설계기준을 준용하여 설계하는 경우가 많다. 특히 기존의 제두부 불안정성에 대한 논의는 적었으며 최근 제두부의 피복석 안정성에 대한 관심이 증대되면서 다양한 접근이 이루어지고 있으나 현실적인 대안을 제시하고 있지는 않다.

우리나라에 설치된 방파제의 경우 대부분이 사석경사제의 형식을 가지고 있으며, 일반적으로 허드슨 공식을 준용하여 피복석 중량을 산정한다.

이러한 제두부에 대한 연구는 제두부 주위의 세굴 특성에 관한 연구(Sumer, 1997)가 진행되었고, 곡선 호안 및 제두부의 안정성에 관한 연구도 진행되었다(Ryu & Sohn, 1999). 다방향 불규칙 파랑에 의한 제두부의 안정성에 관한 연구도 진행된 바 있으며

(Kim, 2000), 제두부의 일반적인 파괴모드에 대한 정리도 제시된 바 있다(CERC, 2002).

기존의 연구를 통한 이안제 제두부의 파괴기구

- 1) 입사하는 파랑의 입·반사파에 의한 제두부 전면에서의 파괴(Van der Meer, 1992).
- 2) 제두부의 사면상을 따라 발달하는 권파쇄파와 흐름에 의한 파괴 (Sumer, 1997).
- 3) 이안제의 기부에서의 세굴 및 퇴적에 의한 파괴 (Ryu & Sohn, 1999).

의 크게 세가지 메카니즘을 가지고 있다. 파랑의 입·반사에 의한 제두부 전면부의 파괴는 경사제의 단면실험의 결과와 유사한 결과를 보인다. 그리고, 사면상의 쇄파에 의한 파괴는 강한 유속과 함께 피복석의 파괴 및 이동에 영향을 미친다. 파향에 따른 사면상을 진행하는 파랑이 수심의 변화와 굴절 및 회절에 의해 에너지가 집중되어 권파쇄파가 만들어지고 강한 흐름을 만든다. 기부의 세굴은 파랑이 구조물에 부딪혀 회절, 굴절 및 반사되어 기부에서 연행한 와류와 정상류의 발달, 그리고, 사면상에서 쇄파 이후에 진행된 흐름이 중앙 후위의 유속을 증가시키

고, 세굴에 의한 기부의 파괴를 발달시키게 된다.

기존의 이러한 연구는 일반적인 지형을 고려한 사석경사제의 설치에 따른 파괴모드이며, 우리나라에 설치된 대부분의 항만에서의 방파제는 항만의 통항로의 좌우에 제두부가 위치하게 된다. 항로주위의 제두부는 통항로 확보를 위한 항로준설에 의해 수심편차가 커지며, 따라서 준설된 수로형 항로 지형과 입사하는 파향을 고려한 안정성 검토는 중요한 문제이다.

본 연구에서는 항로주위의 제두부의 안정성을 항로의 수심과 수로와의 제두부의 거리 그리고 입사하는 파랑조건(파형경사, 다방향성)에 따른 제두부 안정성을 검토하여 항로를 고려한 사석경사제의 제두부 안정성을 검토하고자 한다.

2. 사석경사제 제두부의 안정성

2.1 사석경사제 제두부의 파괴와 파괴율

전술한 바와 같이 이안제의 파괴기구는 다음의 네 가지로 생각할 수 있다.

$$F_D = f_w(S_{\max}, T, H, k, i, K_r, W_a, \alpha_w \dots) + f_b(H, T, i, B, W_a, \nabla_a, \alpha_w \dots) + f_s(T, H, V, D_{50}, f_s, K_r, i, \alpha_w, l_s, h_s \dots) + f_c(h_c, H, T, Q_o, V, K_r, i, \alpha_w \dots), \dots + f_t(h, i, K_D, K_S \dots), \dots \quad (1)$$

여기서, F_D 는 파괴의 함수, T 는 입사파랑의 주기, H 는 입사파고, k 는 파수, K_r 은 반사계수, 피복석의 중량, 제두부로 입사하는 파향, B 는 이안제의 폭, ∇ 는 피복석의 형상계수, i 는 사면의 경사, f 는 저면 마찰계수, D_{50} 은 기부 저면도래의 통과중량백분율이 50인 크기, V 는 유속, S_{\max} 는 방향집중도 파라미터, l_s 는 수로로부터 제두부까지의 거리 그리고 h_s 는 수로의 수심이다. 각 항들이 전체 파괴에 미치는 크기는 서로 다르다. f_w 은 주로 입사하는 파랑에 대해 직접적으로 변형하는 경우이고, f_b 은 사면상의 파랑의 쇄파로 인한 2차적인 변형이며, f_s 은 반복되는 외력에 의해 장기적으로 변형하는 기부세굴에 의한 파괴. 그리고 f_c 는 천단고의 감소에 따른 율파에 의한 파괴이며, f_t 주변지형에 의한 파괴이다. 안정성 연구에서 정량적인 파괴율의 검토를 위한 파괴율의 정의는 필수적이다. 일반적인 파괴의 정의는 피복석의 크기만큼의 이동.

즉, 초기 설치 위치를 벗어난 피복석을 파괴라고 정의하고 전체 피복석의 수에 대한 이동한 피복석의 백분율을 파괴율이라 정한다. 일반적인 파괴율은 다음과 같이 정의한다.

$$D = \frac{\text{Number of stones removed}}{\text{Number of stones with in active zone}} \times 100 \quad (2)$$

(CERC, 1984)

파괴율은 위와 같이 영역내의 전체 피복석에 대한 이동한 피복석의 비를 이야기한다. 그러나 본 연구에서의 대상영역은 공간적으로 피복석의 수가 변화하는 제두부이므로 다음과 같이 제두부 중앙을 중심으로 하여 피복석의 각 방향에 대한 단면상의 피복석수의 대한 단면상에서 파괴된 피복석수의 비로 정의한다.

$$D = \frac{\text{Number of tetrapods removed}}{\text{Number of tetrapods with in active section}} \times 100 \quad (3)$$

2.2. 실험 조건 및 방법

수로형 항로에 의한 사석경사제의 제두부 안정성을 검토하기 위해 구조물의 조건은 단순하게 구성하였으며, 입사하는 파랑조건과 수로의 규모·배치에 주된 변수를 설정하였다. 구조물의 설치 수심은 상대파고 (H/h)가 0.5~0.7에서 구성하였으며, 항로의 규모는 상대수로폭 (b/L)을 0.7~1.2로 하였고, 상대항로수심은 우리나라의 일반적인 사석경사제의 제두부 설치수심과 항로 설계수심을 고려할 때 최초 설계시에는 유사하며 설치이후 지형변화에 의한 항로 매몰에 따른 통항로 준설로 인해 수로 단면과 제두부 설치수심과의 차이가 발생한다. 따라서 상대수로 수심 (h_d/H)은 0.5~1.5의 범위를 가진다. 입사파

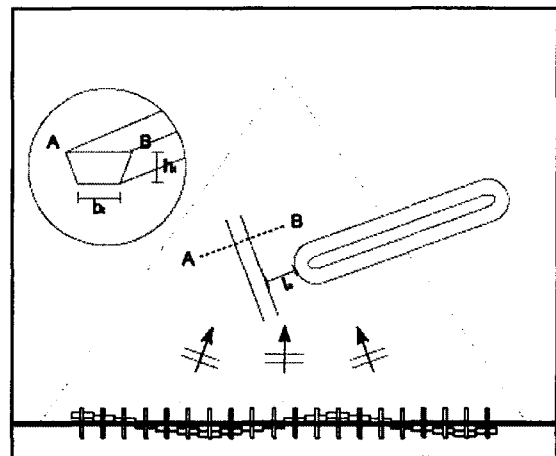


Fig. 1. Experimental Setup.

Table 1 Experiment conditions

| | Physical parameters | Value |
|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| Wave conditions (regular wave) | H(cm) | 4~8 |
| | T(sec) | 1~1.4 |
| | Direction(deg) | 220°, 280° |
| Structure conditions | Armor | T.T.P(20g) |
| | Slope | 1 : 1.5 |
| | Depth(toe) | 20cm |
| | Crest height | Non-overtopping |
| Bottom conditions | Fixed bed | wood |
| | Slope | 1 : 30 |
| | Test time | 600 (wave Number) |

랑은 비쇄파 조건이며, 파괴모드의 단순화를 위해 무월파 조건으로 실험을 실시하였다. Fig. 1은 평면수조 내의 구조물의 배치도이며, Table 1은 본 실험의 실험조건을 나타내고 있다. 안정성 검토에 사용된 T.T.P는 파괴모드의 재현성을 높이기 위해서 입사파랑에 따른 피복석 중량산정공식인 허드슨공식에서 제시하는 중량보다는 비교적 경량을 사용하였다. 저면은 고정상이며, 몰타르와 합판을 이용하여 바닥조면의 조도를 통일 하였다. 내부사석은 사석경사제에서 사용되는 일반적인 입경을 사용하였으며, 중간피복석은 설치하지 않았다.

실험방법은 균등지형에 대한 안정성 검토를 선행하였으며, 여기서 균등지형이라 함은 제두부 주변지형과 항로를 포함한 수로의 수심이 같은 수로가 발달하지 않은 조건이다. 입사파랑조건과 파향을 조정하여 제두부의 파괴모드를 확인하였다.

좌표계는 이안제의 제두부 중심을 원점으로 하고 이안제의 중심축을 +x축으로 하였다. 유속은 도플러 유속계를 사용하여 제두부의 유속장을 계측하였다. 파고는 기부를 따라서 $\alpha=45^\circ$ 간격으로 설치하였고, 입사하는 파랑은 기부 전면 50cm지점에서의 파랑제원을 사용하였다. 파고는 초기파고를 측정하였고, 유속은 사면의 안정후에 제두부 주위의 유속장을 계측하였다. T.T.P는 제두부에는 기부측 하단부터 정적두발길이 2층 쌓기로 18단 적재하였고, 각 구간에 소요되는 T.T.P의 양은 일정하게 하였다. 구조물의 설치는 조파유효영역인 조파판 전면의 6m지점에 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제두부 피복석 파괴모드

성에 대한 평가방법을 달리하여야 하였다. 따라서 제

체부에서는 기존의 일반적인 방법을 사용하여 대상 영역에서의 피복석의 수와 파괴된 사석수의 비를 이용하여 파괴율을 산정하였다. 제두부에서의 방사형태를 가지는 배열을 제체부의 직각배열과 비교하기 위해서 제두부 모든 영역에서의 적재단이 18단 인 것을 이용하여 방사형의 제두부를 직사각형의 제체부형태로 변환하였다. 파괴된 피복석의 위치에 관한 정보는 촬영된 화상과 기록데이터를 이용하였고, 각 단의 T.T.P 수를 기본으로 하여, 하단과 윗 단에 비례값을 곱하여 직각 좌표화하였다.

피복석의 파괴는 주로 파고, 주기, 입사 파향이 지배적인 요인이 된다. Fig. 4에서는 동일한 파형경사를 가지는 파랑을 방향이 다르게(220°, 250°, 280°)입사하는 경우에 대한 제체부 및 제두부의 피복석의 파괴모드를 나타낸다.

가로축은 해당영역이며 세로축은 전술한 파괴율이다. 단면적인 파괴는 정수면 하부의 피복석은 파괴가 되지 않았으며(입사파랑의 파고깊이), 파괴는 사면상의 소상대 중 정수면 상부에서 초기파괴가 발생하고, 계속해서 상단의 TTP가 파괴된다. 그림에서 Section 1 ~ Section 3는 전면 제체부이고 Section 4 ~ Section 7은 제두부이다. 또한 회절 혹은 쇄파에 의한 배후면의 안정성을 확인하기 위해 배후면은 Section 8로 두고 관측하였다.

상단의 그림은 방사형의 제두부를 직각좌표로 변환한 그림이며 그림내부에 음영으로 표시된 영역이 파괴된 피복석의 위치를 나타낸다. 음영의 농도는 짙은 경우가 초기 파괴이며, 연한경우가 최종파괴이다. Fig. 2는 무월파조건에 대한 제두부의 파괴모드이며, Fig. 3은 월파를 고려하였을 경우의 제두부 실험결과이다. 전술하였듯이 양측의 경우 정수면 부근에서 가장 심한 파괴를 보였으며, 제두부 배후면의 경우 회절과 월파에 의한 파괴가 후자의 경우에 발달하는 것을 확인 할 수 있다. 각 조건은 제두부 부근의 수심의 변화가 없는 조건이다.

일반적으로 진행되는 파랑이 수심이 증가하는 영역을 통과할 경우 파고는 감소하는 효과를 보인다. 이러한 파고의 감소는 충분한 상대수심의 변화에 따른 파고의 변화이며, 이러한 파랑의 에너지 감소는 적다. 따라서 상대수심이 커지는 영역을 통과한 후 상대수심이 감소할 경우 천수효과는 더욱 증대될 것이며 이러한 천수효과의 증대는 구조물로 입사시 심각한 에너지 집중을 야기하게 된다. 이러한 경우 제두부로 입사하는 파향이 중요한 변수가 되며, 이러한 파향의 형성에 중요한 영향을 주는 것은 파형경사와 해저지형이다. 본 실험에서는 천수변형 및 굴절변형에 의한 파향의 변화를 고려하지 않기 위해 수심의 변화를 일정하게 하였으며, 입사하는 파향을 변경하

여 심해로부터 발달·진행한 파랑이 항로를 통과하여 구조물로 입사하는 조건을 산정하였다.

Fig. 2의 경우 주기의 증가 시 초기 파괴영역이 배후면으로 이동하는 경향을 보이며, 최종 평형단면에서의 피해규모에 중요한 영향을 준다. 이러한 원인은 파랑의 평면적인 규모와 구조물의 관계를 통해서 주기의 증가는 파장의 증가이며, 이러한 파장의 증가는 구조물의 평면적인 규모와 비교하여 피복석의 평면 피해규모 증가를 가져온다. 또한 파고증가의 경우 사면상의 쇄파와 반사파의 중복영역을 제두부의 전면으로 이동시키며 이러한 중복파영역의 발생은 제두부의 심각한 파괴를 야기한다. 파향의 경우 제두부에서는 동일한 곡률을 보이므로 제두부의 규모와 파랑 특성으로 파괴모드를 예측할 수 있으나, 제체부로 연결된 영역의 경우 반사파의 중첩으로 인해 구조물전체로 입사하는 파향으로 파괴모드를 결정해야한다.

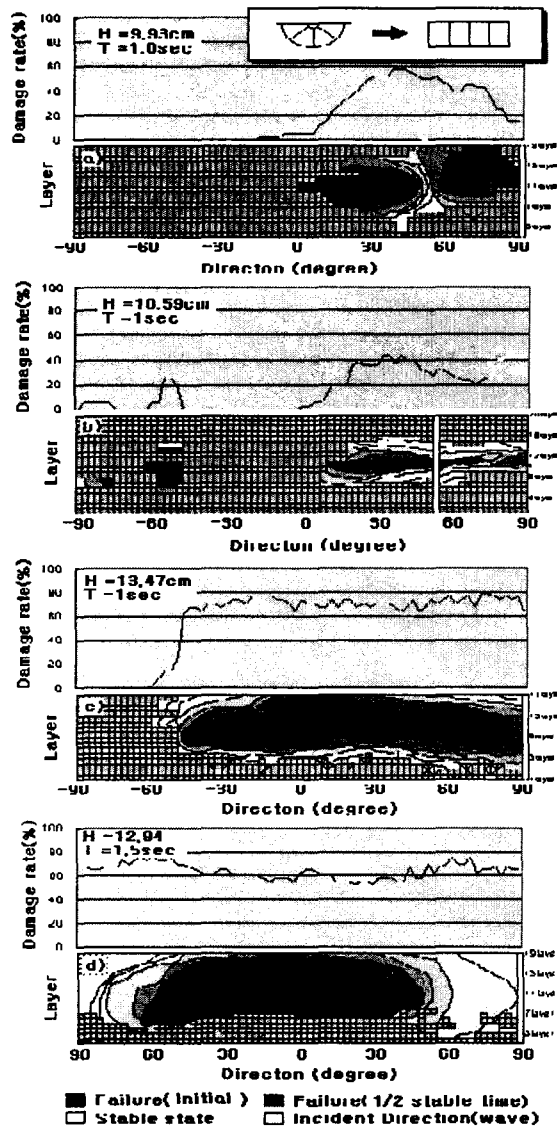
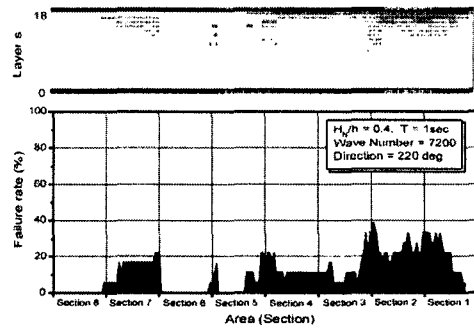
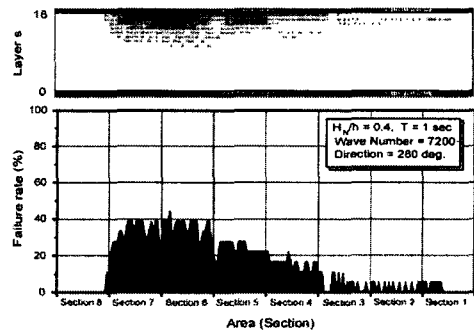


Fig. 2. Failure modes(non-overtopping).

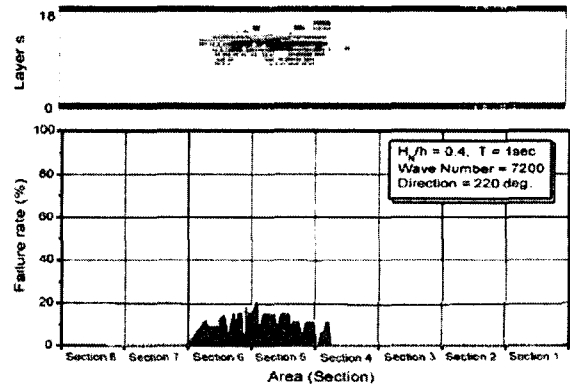


a) Normal direction

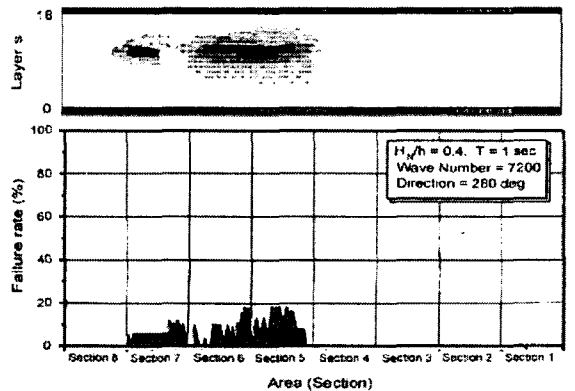


b) Oblique direction

Fig. 3. Failure modes(overtopping).



a) Normal direction



b) Oblique direction

Fig. 4. Failure modes(through).

Fig. 3의 경우 월파를 고려한 제두부의 파괴모드이며, 월파의 발생에 따라 제두부의 배후면 Section 7 영역의 파괴가 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. Section 8의 경우 사석경사제의 단면실험의 결과에서도 예측이 가능 하나 Section 7영역에서는 반사파와 사면상의 쇄파 그리고 월파의 중첩으로 Section 7 영역의 파괴가 가장 심하게 발생한다.

Fig. 4의 경우 무월파 조건이며, 전면에 수로설치에 따른 파괴모드를 나타낸다. 결과에서 구조물 전면 수심의 변화 즉 항로를 통과한 파랑이 구조물로 입사할 경우 균등한 지형의 경우보다. 쇄파가 더욱 발달하며 이러한 제두부 사면상의 쇄파발생은 피해영역이 Fig. 3의 Section 5영역에 해당하는 전면부로 이동하는 경향을 보인다. 또한 쇄파에 의한 제트류가 입사하는 영역이 정수면에 가깝게 낮아지는 경향을 보이며, 이러한 현상은 입사파랑이 장주기인 경우 파괴모드가 현저하다. 위의 결과에서 월파를 고려할 경우에는 동일한 파랑 입사 시 배후면의 피해는 감소한다.

균등한 지형에서의 결과와 비교하여 전체적인 파괴율은 감소하나 제두부의 끝단에 파괴가 집중되는 현상을 보인다. 이러한 현상은 수로에 의한 기부의 외측 수심의 증가로 제두부 사면상의 쇄파 발생위치가 감소하여 파력이 정수면에서 하부까지 작용하며 이러한 현상이 제두부 피복석의 안정성에 작용하는 항로의 효과일 것이다.

3.2 제두부의 유속분포

외해로부터 입사하는 파랑은 제두부에서의 공간적인 변형이 이루어지며 전절에 제시하였던 반사와 쇄파, 월파 그리고 회절현상이 주된 변형이다. 그러나 사석경사제의 단면안정성과는 달리 제두부의 안정성은 입사하는 파향과 변형하는 파향의 중첩정도로서 그 외력조건이 증대된다. 이러한 현상을 동시에 파악하기 위해서는 위상의 관측과 함께 각 지점에서의 3축 유속분포가 중요한 의미를 가진다. 이를 위해 제두부 주위의 유속을 관측하였으며, 입사파랑조건에 따른 각 지점에서의 최대유속분포는 Fig. 5과 같다.

유속의 분포는 파향에 따라 중복파와 회절에 의한 효과에 의해 수직으로 입사하는 파향에 대해서는 중심 후면부의 유속이 발달하여 있는 것을 알 수가 있고, 회절하여 돌아가는 leewake vortex의 발달도 확인할 수가 있다. 이러한 균등한 지형에서의 유속크기의 분포는 비교적 제두부에서의 파괴모드와 일치하며 잘 재현하고 있다. 항로에 의한 제두부의 유속 분포는 사면상의 쇄파발생 위치가 정수면 부근의 아래쪽에 입사하게 되어 반사파와 회절파가 기존의 위치보다 아래에서 중첩되게 되며, 결과적으로 기존의

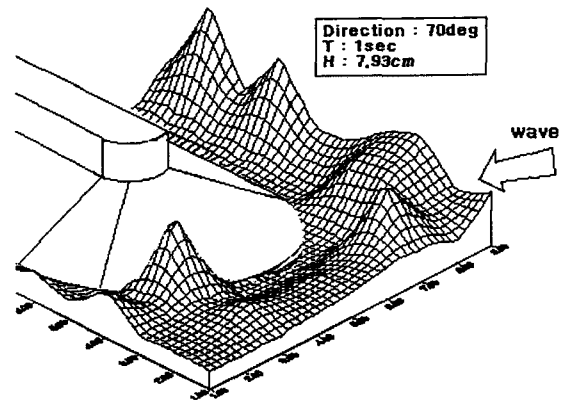


Fig. 5. Maximum velocity field around head of breakwater.

균등한 제두부 단면보다 외해쪽으로 이동한 주요 파괴 영역이 나타난다. 이러한 파괴는 장주기 고파랑의 내습시 정수면 부근의 파괴를 증가시키고 기존의 피복석 안정성보다 파랑의 에너지가 집중되어 제두부에 입사하는 경향을 보인다.

Fig. 6은 제두부에 경사 입사하는 파랑의 최대유속을 나타내며, 수로가 설치되어 수로상부에서 파랑에 의한 수립자 속도의 변형을 확인 할 수 있다. 이러한 최대수립자속도의 분포는 사면상의 쇄파에 의해 배후면의 유속이 강화된 것을 확인 할 수 있다.

수로상부를 통한 최대 수립자속도의 감소는 나타나지 않으며, 이는 수로에 의한 파괴 감소로 인해 파랑의 에너지가 소산되지 유효하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 수로 상을 진행한 파랑의 경우 사석방파제에서 쇄파와 에너지의 집중으로 제두부의 파괴가 야기 될 수 있다.

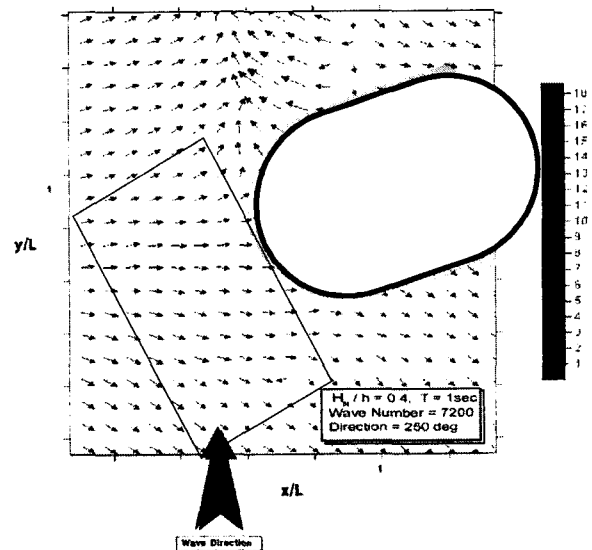


Fig. 6. Velocity field around head of rubble mound breakwaters.

4. 결론

이상으로 항로 혹은 제두부 주위의 지형조건에 따른 사석경사제 제두부의 안정성 실험을 통해 지형과 입사파랑조건에 따른 제두부 주위의 유속과 피복석의 공간적인 파괴모드를 확인 하였다.

연구결과를 정리 하면 다음과 같다.

- 1) 균등한 지형 즉 일반적인 지형의 경우 구조물의 규모와 입사파랑의 평면적 비에 의해 초기파괴위치 변화하는 것을 확인하였다.
- 2) 사석경사제 제두부 피복석의 파괴모드를 확인 하였으며 제두부 전면의 수로형 지형을 통해 고파랑의 입사시 항로수심이 인근 제두부에 미치는 영향은 쇄파지점의 이동, 제두부 끝단의 흐름발달 등이 관측되었다.
- 3) 항로준설, 표사이동 등에 의한 사석경사제 제두부 주위의 수심변화는 입사하는 파향에 따라 제두부의 안정성에 중요한 영향을 미친다.

본 연구는 방향성파랑을 조건으로 실험을 행하였고 차후에는 다방향 불규칙파에 대한 이안제의 상호관계에 대한 연구도 계속하여 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Arnskov, M.M., Fredso, J. and Sumer, B.M., "Bed Shear Stress Measurements over a Smooth Bed in Three-dimensional Wave-current Motion", Coastal Engineering Vol. 20, 277-316, 1993.
- 2) Deigaard, R., J. Fredsoe, "Shear Stress Distribution in Dissipative Water Waves", Coastal Engineering Vol. 13, 357-378, 1989.
- 3) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Scour at the round head of a rubble-mound breaker", ASCE, coastal Engineering Vol. 29, 231-262, 1997.
- 4) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Turbulent Boundary layer in wave-current motion", ASCE, Hydro Engineering, Vol. 110, No. 8, 1103-1120, 1984.
- 5) Fredsoe, J., "Modelling of Non-cohesive Sediment Transport Processes in the Marine Environment", Coastal Engineering Vol 21,

71-103, 1993.

- 6) Foti, E. and Blondeaux, P., "Sea Ripple Formation: the Heterogeneous Sediment Case", Coastal Engineering Vol. 25, 237-253, 1995.
- Nelson, R.C., "Wave Bed Friction Damping over Shoaling, Movable Beds", Coastal Engineering Vol. 25, 65-80, 1995.
- 7) Kroon, A., Hoekstra, P. Houwman, K. and Ruessink, G., "Morphological Monitoring of a Shoreface Nourishment Nourtec Experiment at Terschelling, The Netherlands", Coastal Engineering, No. 161, 2222-2236, 1994.
- 8) Pedersen, C., Deigaard, R. and Fredsoe, J., and Hansen, E.A., "Numerical Simulation of Sand in Plunging Breakers", Coastal Engineering, No. 180, 2344-2357, 1992.
- 9) Purandare, M.M. and Narayana, P.A.A., "Wave Power Variation in the Near-shore Regions", Coastal Engineering Vol. 11, 381-390, 1987.
- 10) Ranasoma, K.I.M. and Sleath, J.F.A., "Velocity Measurements Close to Rippled Beds", Coastal Engineering, No. 183, 2383-2396, 1992.
- 11) Saito, E. and Shibayama, T., "Local Scour around a Large Circular Cylinder on the Uniform Bottom Slope due to Waves Currents", ASCE, Coastal Engineering, No. 214, 2799-2810, 1992.
- 12) Sumer, B.M., Laursen, T.S. and Fredsoe, J., "Wave Boundary Layers in a Convergent Tunnel", Coastal Engineering Vol. 20, 317-342, 1993.
- 13) Toue, T., H. Katsui, K. Nadaoka, "Mechanism of Sediment Transport around a Large Circular Cylinder", Coastal Engineering, Vol. 2, No. 219, 2867-2878, 1992.
- 14) Van der Meer, Jentsje W. , "Rock slopes and Gravel Beaches under wave attack", Delft Hydraulics Communication, 1988.
- 15) Van der Meer, J.W. and Vedman, Johannes J., "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport" ASCE, Coastal Engineering, Vol.17, 153-171, 1992.
- 17) 榎木 亨 著, "漂砂와 海岸侵蝕", 清文閣, 1996.