

## 저천단 방파제에서의 소단규모에 따른 월파특성에 관한 연구

김홍진\* · 전용호\* · 류청로\*\*

A study on characteristics of overtopping rate with Berm's size  
at the low crest breakwater

Hong-Jin Kim\* · Yong-ho Jeon\* · Cheong-Ro Ryu\*\*

**Key Word** : Overtopping Rate(월파량), Low Crest Breakwater(저천단 방파제), Berm(소단),  
Failure Modes(파괴모드)

### ABSTRACT

Wave overtopping is one of the most important hydraulic responses of breakwater because it significantly affects its functional efficiency, the safety of transit and mooring on the rear side, wave transmission in the sheltered area, rear side armor stones and to some extent, the structural safety itself .

The hydrodynamic characteristics of low crest breakwater by the overtopping rate can be summarized as follows:

1. It is better to use maximum overtopping rate than to use mean overtopping rate for design of coastal structures.
2. Maximum overtopping rate was increase with wave steepness (between 0.01 and 0.02).
3. Overtopping rate is decreased when relation length of berm was over wave length.

### 1. 서 론

방파제나 호안과 같은 해안구조물에서의 월파는 입사하는 파랑에 대한 구조물의 상호작용으로 발생하며 이는 해안구조물의 이용에 가장 중요한 수리학적 현상 중의 하나이다. 왜냐하면 월파는 호안이나 방파제에서 통로의 안정성, 배후면에 계류 및 설치된 시설물의 안정성, 제체 안쪽의 안전지대로의 전달파, 그리고 구조물 자체의 안정성 등의 기능적인 면에 심각한 영향을 준다. 따라서 이러한 월파에 대한 연구는 기본적이며 필수적이다.

월파량에 대한 기존의 연구는 주로 월파량의 산정 및 예측에 대한 기준을 마련하는 것이 대표적인 연구활동이었다. 이에 대한 여러 가지 이론적인 접근은 종종 Weir모델에서의 단순한 정상흐름에 제안되었고, 더욱 최근에는 에너지적 관점과 비회전성흐름의 해석을 통해 제안되

었다.

현대의 해안구조물의 월파량 예측치는 현장 수리학적인 모델과 제한된 경험식에서 얻는다. 널리 사용되는 방법은 SPM(Shore protection Manual, 1984)과 Goda(1985)에 의해 제시된 월파량의 산정식이 현재까지도 간단한 Run-up과 월파량을 계산하는 데에 널리 사용되고 있다.

월파량은 천단고를 기준으로 한 구조물 전·후면 피복석의 안정성 및 기능성에 중요한 파라미터가 된다. 일반적인 월파량의 산정은 월파 호안 혹은 방파제의 경우에 대한 경험식 혹은 산정식이 사용되고 있다. 허나 다양한 대상해역의 조건과 새로운 구조물의 형식 문제가 발생하게 되면서 이에 대한 새로운 검토·연구가 필요하다.

본 연구는 연약지반의 경우에 총 중량이 제한된 상태의 연약지반 저천단 구조물에 여러 설계파랑조건이 입사할 때의 수리학적 안정성 및

기능성을 파악하고자 월파현상을 중심으로 논의하고자 한다.

## 2. 본 론

가. 연약지반 방파제와 월파량

본 연구에서 대상으로 하고있는 구조물의 형식은 연약지반 방파제이다. 일반적인 월파량 산정공식에서 문제가 되는 것은 적절한 천단고의 결정이다. 허나 대상해역의 지반 강도가 약하여 설치지역의 조건에 따른 방파제의 자중을 제한하는 경우에 대해서는 적절한 허용월파량과 천단고에 대한 연구를 수행하여 구조물의 기하학적인 특성과 입사파랑과의 관계를 확인하는 것이 필수적이다.

본 연구에서 적용된 공법은 소단설치공법이며 소단설치공법은 구조물 전면의 수심감소 및 지반에 대한 재하하중의 역할을 하기 위해 소단과 같은 형식으로 구조물을 확장하게 된다.

따라서 본 연구의 목적은 이러한 연약지반 방파제에서의 소단의 설치에 따른 구조물의 안정성과 입사파랑의 변형을 확인하는 것이 주된 목적이다.

일반적인 소단 방파제에서 고려하는 물리량들은 다음과 같은 항들을 고려할 수 있다. 전술한 바와 같이 방파제의 파괴기구는 다음의 세가지로 생각할 수 있다.

$$F_D = f_w(T, H, k, i, K_r, W_a, \alpha_w \dots) + f_b(H, T, i, B, W_a, \nabla_a, \alpha_w \dots) + f_s(T, H, V, D_{50}, f_s, K_r, i, \alpha_w \dots) + f_c(h_c, H, T, Q_o, V, K_r, i, \alpha_w) \dots \quad (1)$$

여기서,  $F_D$ 는 파괴의 함수,  $T$ 는 입사파랑의 주기,  $H$ 는 입사파고,  $k$ 는 파수,  $K_r$ 은 반사계수, 피복석의 중량, 구조물로 입사하는 파향,  $B$ 는 이안제의 폭,  $\nabla$ 는 피복석의 형상계수,  $i$ 는 사면의 경사,  $f$ 는 저면 마찰계수  $D_{50}$ 은 기부 저면 모래의 통과중량백분율이 50인 크기,  $V$ 는 유속

Table 1 Experiment conditions

	Physical parameters	value
Wave conditions (Irregular wave)	H1/3(cm)	6~17
	T1/3(sec)	1.5~2.5
	Spectrum	JONSWAP
	Depth(cm)	45
Structure conditions	Armor	tetrapod(500g)
	Core	riprap(3-10g)
	Slope depth(toe)	1 : 1.5
	Berm(height/length)	45cm
Bottom conditions	Still	Smooth
	Slope	1 : 30
	Tested wave number	1000

이다. 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 기부 세굴에 의한 파괴이다. 그리고  $f_c$ 는 천단고의 감소에 따른 월파에 의한 파괴이다. 이러한 구조물의 안정성의 검토 요소 중에서 본 연구에서는 단면의 규모는 일정하게 하였으며 입사파랑의 조건과 압사석의 규모를 조정하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 실험조건이다. 입사파랑의 조건은 불규칙파랑에 대해 조파하였고, 목표스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 예비실험을 통해서 검출된 해석스펙트럼과 비교하여 입사파랑의 제원을 결정하였다. 구조물의 단면은 투과성 사석구조물이다. 내부 사석과 피복석은 대표적인 방파제 단면에 대해서 구성하였다. 방파제의 단면은 변형하지 않았으며 전면의 소단규모만 변형하여 소단규모에 따른 월파량을 계측하였다. 바닥은 매끈한 철제 수조조건이며 월파량측정에서의 통계적인 안정치를 확보하기 위하여 1000이상의 파수만큼 검출하였다. 월파량의 검출은 Fig. 1의 우측과 같이 월류수조를 제작하여 수조내에 수위계를 설

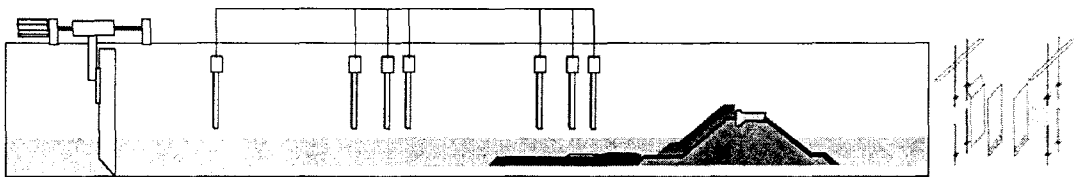


Fig. 1. Experimental setup.

치하여 월파량을 계측하였다.

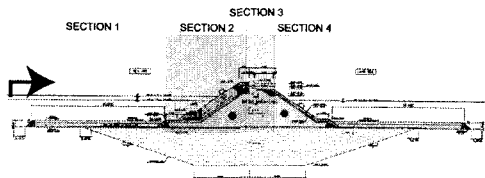
Fig. 1은 수조내에 구조물이 설치되어있는 설치 단면이며 조파판전면에 파고계 1기를 설치하여 심해 입사파랑조건을 적용하였으며 3점법에 의해 입사파랑과 반사파랑을 분리하였다. 구조물은 조파판으로부터 17m 지점에 기부를 설치하였고 수심은 45 cm 이다. 구조물의 높이는 저면으로부터 55 cm 이고 구조물은 투과성이다.

나. 실험결과

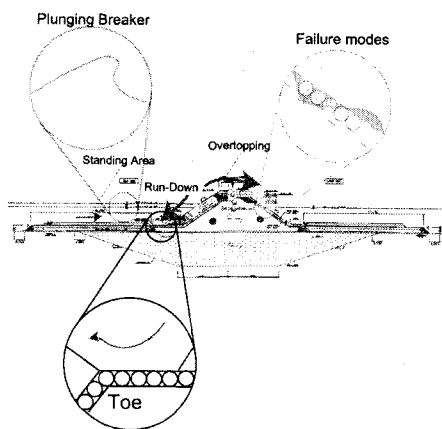
(1) 압사석 설치에 따른 파괴모드

일반적으로 압사석 설치에 따른 파괴모드는 Fig. 2. 의 a)와 같이 영역을 구분하여 논의 할 수있다. Section 1은 전면의 소단설치영역, Section 2는 전면피복석 영역, Section 3는 상치 콘크리트 영역 그리고 Section 4는 배후면의 피복석 영역이다.

소단설치에 따른 파괴모드는 크게 파랑의 입사에 따른 전면 피복석의 파괴, 소단상부에서의 쇄파의 발생, 월파에 의한 배후면 피복석의 파괴 그리고 사면상 흐름의 증가에 따른 기부의 파괴로 총 네가지로 구분되며 각각의 파괴모드는 Fig. 2와 같다. 이는 일반적인 사석방파제와 유사한 파괴모드를 가지고 있으며 특이할 현상



a) Definition of Section.



b) Deformation of Waves.

Fig. 2. Failure Modes.

은 소단상부에서의 쇄파발생이다. 소단부의 규모는 구조물 전면에서의 소파발생에 직접적인 영향을 주며 이러한 소단의 규모에 따라 발생하는 쇄파의 형태도 약간의 차이를 보였으나 대부분이 권파쇄파(Plunging Breaker)였으며 이러한 권파쇄파의 발생은 구조물전면의 안정성 및 월파량에 중요한 역할을 한다.

발생된 쇄파는 정수면 상부에 직접 입사하여 저천단 구조물의 월파량의 증가를 가져오며 이러한 월파의 증가는 배후면 피복석의 안정성에 영향을 준다. 또한 쇄파의 발생은 사면상의 흐름을 강화하여 기부 세굴을 야기한다.

(2) 최대월파량과 평균월파량

일반적인 월파량의 산정에 사용되는 방법은 단위시간당의 단위폭을 통과한 집수량으로 정의된 평균월파량의 방법을 따른다. 허나 본 실험에서의 실질적인 피복석의 파괴는 쇄파에 의해 증가된 최대 월파량의 편차에 의한 경우였다. 최근의 연구동향 또한 최대월파량에 대한 월파량의 발생빈도를 검토하는 경향을 가지고 있다. Fig. 3은 대표적인 실험조건에 대한 평균 월파량과 최대 월파량과의 관계를 보여주고 있다.

그림에서 간단하게 각 경우를 비교하면 Case 02의 경우는 소단이 설치되지 않은 경우이며 Case 03의 경우가 가장 규모가 큰 소단의 규모이다. 작용된 파랑조건은 동일하며 제반조건 또한 동일하다. Case 02에서 Case 04 까지 최종 누적 월파량은 유사하나 Case 02가 점진적으로 월파량이 누적되는 경우와 비교하여, Case 03의

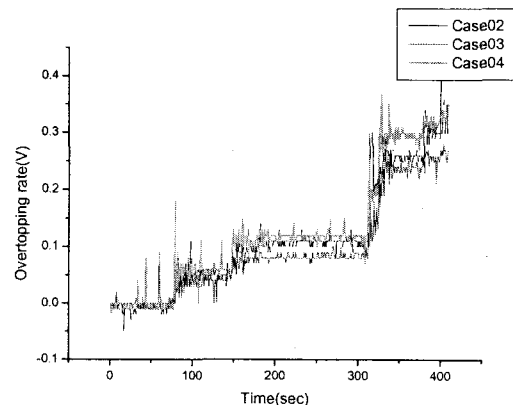


Fig. 3 Variation of accumulated overtopping discharge rate with Time.

경우는 누적월파량의 증가가 300초 정도에서 심하게 일어난다. 이는 최대 월파량의 증가를 보여주며 원인은 소단상부에서의 쇄파이다. 이렇게 증가된 월파량은 피복석 및 제체에 심각한 피해를 야기할 수도 있을 것이다.

(3) 구조물의 규모와 월파량

본 연구에서는 구조물과 입사하는 파랑과의 관계를 검토하기 위해서 쇄파지수에 따른 월파량의 분포를 확인하였다. Fig. 4에서는 쇄파지수에 따른 평균월파량과 최대월파량의 분포를 보이고 있다. 주로 쇄파지수가 4에서 5사이의 값일 때 발생하는 권파쇄파에 의해 강화된 월파에 의해서 월파량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 전체월파량의 편차는 최대월파량의 편차에 비해서 적음을 알 수 있으며, 최대월파량과 전체월파량의 분포에서  $\xi$ 가 5.3일 때 최대 값이 나타났다. 이는 본 실험에서 사용된 구조물의 조건이 1:1.5임을 생각할 때 쇄파지수가 4에서 6의 값을 가지는 경우에 대한 설계파랑의 입사조건일 때 월파량의 증가를 고려하여야 할 것이다. (권파쇄파조건)

여기서  $\xi$ 는 구조물과 입사파랑의 관계를 내는 변수로

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L_0}} \quad (1)$$

로 정의된다. 여기서  $\theta$ 는 구조물의 경사이며,  $H$ 는 입사파랑,  $L_0$ 는 심해파장이다. Fig. 4에서는 구조물의 규모와 입사파랑에 따른 월파량의 변화를 검토하였지만 소단설치에 따른 월파량의 변화는 나타나지 않는다. 따라서 Fig. 5와

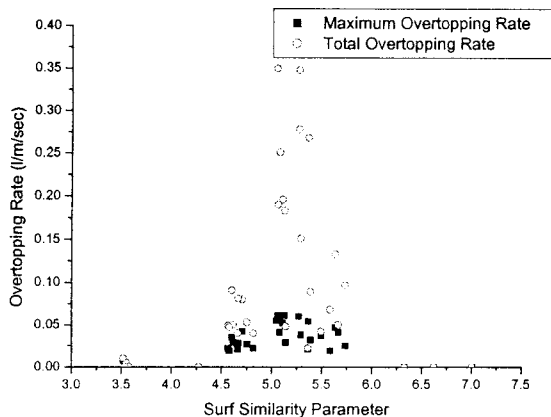


Fig. 4. Distribution Overtopping rate with  $\xi$ .

Fig. 6에서와 같이 소단의 규모를 x-방향 성분과 z-방향성분에 대해 검토하였다.

Fig. 4 ~ Fig. 6과 예서와 같이 구조물의 규모와 입사파랑에 따른 월파량의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 구조물의 길이에 대한 입사 심해파장의 비를 이용하여 월파량의 변화를 검토하였다. 여기서 심해파장과 소단길이의 비는 주기의 효과에 대한 소단규모를 확인하기 위해서이며 결과는 Fig. 5와 같이 소단길이의 증가는 월파량의 감소를 가져옴을 알 수 있다. 허나 이 값은 심해파장에 대한 값이므로 본 그래프에서는 월파량의 변화가 크게 나타난다. 따라서 소단의 상대길이가 1이 이상이 될 때 유의적인 월파량의 감소를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 소단상부의 상대수심에 따른 월파량의 변화를 나타내고 있다. 본 실험에서 적용된

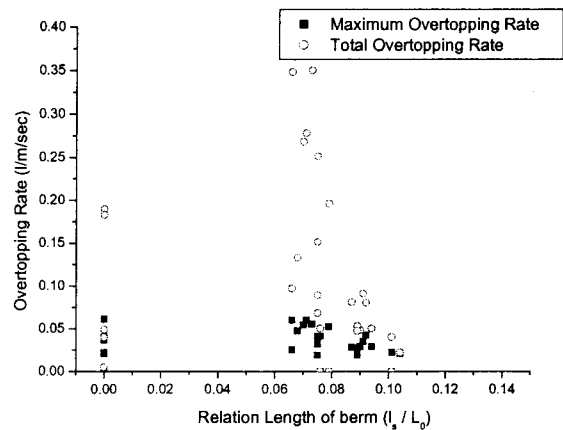


Fig. 5. Distribution overtopping rate with relation length of berm.

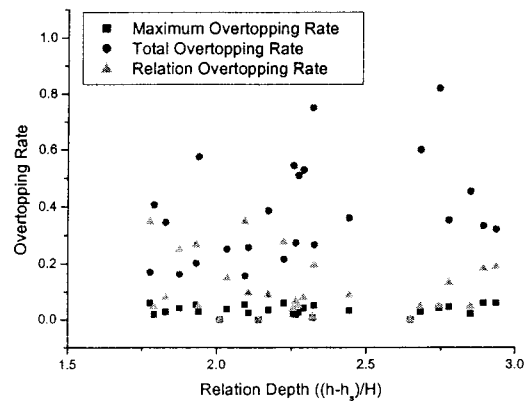


Fig. 6. Distribution overtopping rate with relation depth.

소단 높이에 대한 입사파랑의 파고의 비가 증가함에 따라 전체 월파량은 증가하나 최대월파량은 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 상대월파량의 경우는 감소하는 경향을 보인다.

(4) 파형경사에 따른 월파량의 분포

본 연구에서 월파량에 가장 영향을 많이 주는 인자는 쇄파이다. 따라서 일정한 구조물 조건에서 쇄파의 형태를 결정하는 파형경사에 대한 월파량의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 7에서 파형경사에 따른 월파량의 변화는 본 실험에서 사용된 파형경사 조건인 0.01~0.02의 범위에 분포하며 파형경사의 증가 혹은 감소에 따라 월파량의 발생은 작아진다. 이는 대상해역의 소단규모 설계 시에 파형경사의 범위를 고려하여 설계에 반영하여야 하며 만약 설계에 고려하지 않은 경우 월파량의 증가로 인한 2차적인 안정성에 문제가 야기 될 수도 있다.

이는 월파를 고려한 해안구조물의 설계에 중요한 요소가 되며 호안의 경우 제내지의 침수 및 통행의 안전에 직접적인 영향을 준다.

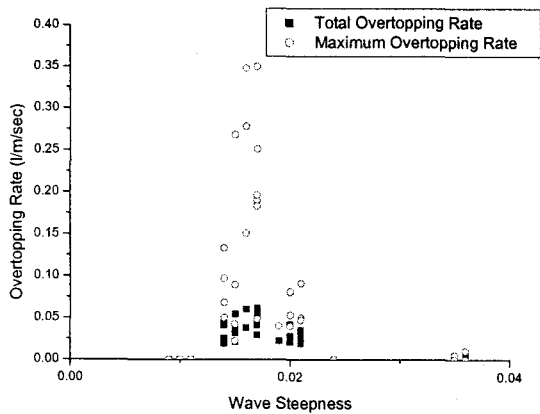


Fig. 7. Distribution overtopping rate with wave steepness.

(5) 최대월파량의 발생

일반적으로 최대월파량이라 함은 단위 시간당 작용한 단위폭당의 저수율을 평균월파량으로 정의 할 때 각 개개 월파량의 최대값을 이야기한다. 이는 순간적으로 많은 에너지를 동반하므로 구조물의 배후 및 제체 자체의 안정성에 중대한 영향을 준다.

Fig. 8은 입사하는 파랑의 수위시계열과 최대

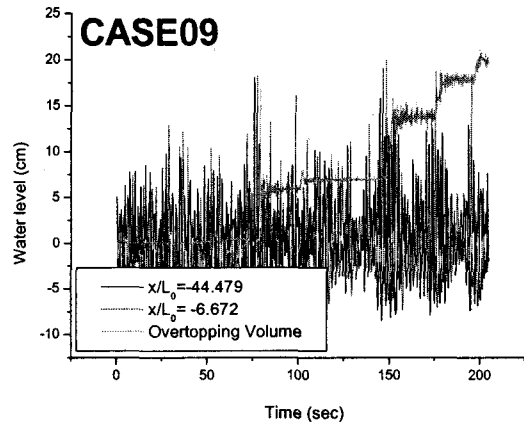
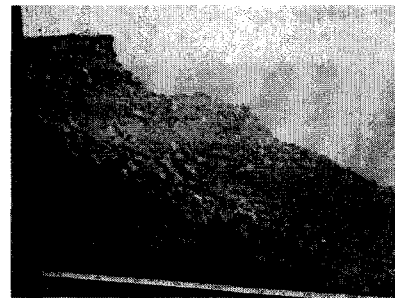


Fig. 8. Variations of Overtopping rate and Waterlevel with time.

월파량의 분포를 나타내고 있는 것이다. 그림에서 150 sec ~180 sec구간의 값이 해당 케이스의 최대월파량을 나타내며 일반적으로 월파량과 천단고는 지수관계를 만족하며, 최대월파량의 경우 Weibull 분포를 만족하는 것이 기존의 연구자들을 통해서 보고 된 바 있다.

Fig. 9는 최대월파량에 의해 파괴된 배후면의 사진이며, Fig. 10는 월파량은 크지 않으나 평균월파량에 의한 파괴 모습이다.



a) Failed Scene by maximum overtopping



b) Failed Scene by mean overtopping

이는 구조물의 안정성에 중요한 문제가 되는 초기파괴가 최대월파량이 큰 경우에 발생하기가 쉽다.

### 3. 요약 및 결론

이상의 소단규모에 따른 월파량의 수리학적 발생 특성을 살펴보았다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 월파에 의한 구조물의 안정성을 기존의 평균 월파량을 이용하는 것 보다 최대월파량을 이용하는 것이 더욱 적합하다.
2. 소단규모에 따른 쇄파의 발생은 최대월파량의 증가를 가져오며 이는 파형경사가 0.01~0.02의 범위일 때 최대월파량의 증가가 나타난다.
3. 소단의 상대길이는 파장이 1배 이상 일 때 = 월파량이 적게 발생하였다.

- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Sumer, B.M., Laursen, T.S. and Fredsoe, J., "Wave Boundary Layers in a Convergent Tunnel", Coastal Engineering Vol. 20, 317-342, 1993.
- 9) Toue, T., H. Katsui, K. Nadaoka, "Mechanism of Sediment Transport around a Large Circular Cylinder", Coastal Engineering, Vol. 2, No. 219, 2867-2878, 1992.
- 10) Van der Meer, Jentsje W. , "Rock slopes and Gravel Beaches under wave attack", Delft Hydraulics Communication, 1988.
- 11) Van der Meer, J.W. and Vedman, Jonhannes J., "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport" ASCE, Coastal Engineering, Vol.17, 153-171, 1992.
- 12) Voulgaris, G., Wallbridge, S. Tomlinson, B.N. and Collins, M.B., "Laboratory Investigations into Wave Period Effects on Sand Bed Erodibility, under the Combined Action of Waves and Currents", Coastal Engineering, Vol. 26, 117-134, 1995.
- 13) Claudio Franco and Leopoldo Franco, "Overtopping Formulas for Cassion Breakwater with Non-breaking 3D waves", WaterWay, Port, Coastal and Ocean Engineering, Mar/Apr 98-108, 1999.
- 14) 榎木 亨 著, "漂砂와 海岸侵蝕", 清文閣, 1996.