

월파에 대한 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Sloped Coastal Structures against Random Wave Overtopping

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

요 旨 : 신뢰성 기법을 도입하여 경사식 해안 구조물에 발생하는 월파현상을 해석하였다. 월파와 관련된 많은 변수를 고려할 수 있을 뿐만 아니라 예측능력이 우수하다고 판단되는 경험식을 이용하여 신뢰함수가 유도되었다. 일반적으로 인정되는 범위내에서 설정된 확률변수의 통계적 특성과 분포함수를 이용하여 허용 월파량을 초과하는 파괴확률이 무차원 천단고의 함수로 산정되었다. 피복재의 종류와 구조물 전면의 경사에 따른 파괴확률의 차이도 해석되었다. 또한 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭 변화에 대하여도 해석하였다. 마지막으로 각 확률변수의 불확실성에 따른 민감도 분석이 수행되었다. 월파와 관련된 제반 특성들이 잘 묘사되었을 뿐만 아니라 결정론적 설계법에서는 규명할 수 없는 허용 월파량을 초과하는 파괴확률들이 정량적으로 산정되었다. 따라서 천단고를 결정할 때 확률적인 개념을 가미함으로써 설계의 효율성을 높일 수 있다.

핵심용어 : 신뢰성 해석, 허용월파량, 파괴확률, 천단고, 민감도분석

Abstract □ A reliability analysis is straightforwardly applied to the sloped coastal structures against the random wave overtopping. A reliability function can be directly derived from a empirical formula in which may take into account many variables associated with the random wave overtopping. The probability of failure exceeded the allowable overtopping discharge can be evaluated as a function of dimensionless crest height with some reasonable statistical properties and distribution functions of each random variable. Some differences of probabilities of failure occurred from variations of the slopes of structures as well as types of armour are investigated into quantitatively. Additionally, the effects of the crest width of units placed in front of the concrete cap on the probability of failure may be analyzed. Finally, the sensitivity analyses are carried out with respect to the uncertainties of random variables. It is found that the overall characteristics similar to the known experimental results are correctly represented in this reliability analyses. Also, it should be noted that the probabilities of failure may be quantitatively obtained for several structural and hydraulic conditions, which never assess in the deterministic design method. Thus, it may be possible for determination on the crest height of sloped coastal structures to consider the probability of failure of wave overtopping, by which may be increased the efficiency of practical design.

Keywords : reliability analysis, allowable overtopping discharge, probability of failure, crest height, sensitivity analysis

1. 서 론

해안 구조물과 입사파랑의 상호작용에 의해서 나타나는 여러 가지 수리학적 특성들을 정확하게 예측하는 문

제는 해당 구조물의 올바른 설계를 위해 반드시 필요하다. 특히 월파 또는 처오름은 호안이나 방파제와 같은 해안 구조물의 천단고를 결정하는데 있어 가장 중요한 변수 중 하나로, 해안 구조물 배후면의 기능성에 상당한 영

*강원대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-Dong, Chuncheon, Kangwon-Do, 200-701, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

향을 줄 수 있다. 심지어는 월파나 처오름에 의하여 방파제 배후면의 구조적 안전성 자체가 위협을 받을 수도 있다. 따라서 다양한 단면 및 파랑조건에서 이들 두 가지 현상에 대한 해석이 필요하다. 일반적으로 처오름이나 월파는 여러 가지 변수들에 의하여 영향을 받게 된다. 경사각, 수심 그리고, 천단폭 등과 같은 기하학적인 변수와 공극율, 피복재의 종류, 크기, 그리고 피복층의 두께 등과 관련된 해안 구조물의 구조적인 변수이다. 또한 해수면의 높이, 입사파고, 주기, 파향, 그리고 쇄파 여부 등도 중요한 수리학적 변수이다. 여러 연구자들이 월파량의 정확한 예측을 위해 많은 연구를 수행하였음에도 불구하고, 일반적인 적용성을 가지고 정확하게 월파량을 예측하는 것은 매우 어렵다. 이는 이미 언급한 바와 같이 월파 현상이 다른 어떤 문제보다도 수리학적으로 복잡하기 때문이다.

현재까지 월파량을 산정하기 위한 많은 경험식들이 실험 자료를 근간으로 제시되어 왔다. 대부분의 경험식들은 관련된 변수들을 몇 개의 무차원 변수로 정의하여, 임의의 함수관계식을 구성하는 방법으로 월파량을 예측하고자 했다. 비록 월파에 의한 피해는 주로 침두 월파량에 의하여 발생될 가능성이 높지만, 대부분의 경험식에서 산정하는 월파량은 일정 시간 동안 발생하는 평균적인 의미의 월파량이다. 따라서 본 연구에서 정의된 월파량도 단위폭당 평균 월파량을 의미한다. 현재 미국을 중심으로 가장 일반적으로 적용되고 있는 SPM(1984), ACES(1992)의 방법은 Saville(1955)의 규칙파에 대한 실험자료를 근간으로 Weggel(1976)이 제시한 월파량 산정식을 근간으로 하고 있다. Hu and McCauley(1998)는 SPM의 방법을 불규칙파로 확장하는 확률적인 해석방법을 제시하기도 하였다. 한편 Owen(1980)은 불규칙파에 대한 실험 자료를 이용하여 불투수성 단순 경사면에 적용 가능한 월파량 산정식을 제시하였다. 무차원 월파량이 무차원 천단고와 지수 함수적인 연관성을 갖는다고 제시하였다. 지수 함수식은 두개의 경험상수에 의하여 올바르게 정의되는데, 이 두개의 경험상수는 함수식에 양함수적으로 고려되지 않은 변수들, 즉, 경사나 소단의 영향 등을 고려하기 위하여 도입된 것이다. Allsop and Franco(1992), De Waal and Van der Meer(1992), Van der Meer and Stam(1992), Juhl and Sloth(1994), 그리고 Hebsgaard *et al.*(1998) 등의 많은 연구자들이 Owen(1980)의 개념을 이용하여 경험상수를 정확히 해석하려고 노력하였다. 그러나 제시된 대부분의 경험식들은 새로운 조건의 자료와 만족스런 일치성 보이지 못하였다(De Rouck *et al.*, 1999). Shankar and Jayaratne

(2003)의 연구에 의하면 SPM(1984)의 방법은 해석된 조건에서 약 45%를 과소평가하고, De Waal and Van der Meer(1992), Van der Meer and Stam(1992), Van der Meer and Janssen(1994)의 방법은 약 35%를 과대평가한다. 여러 가지 원인이 있으나, 이와 같은 차이를 보이는 중요한 이유 중 하나가 경험식을 얻기 위한 실험이 주로 현장 조건보다 규모가 작은 조건에서 수행되었기 때문이다. 한편 Owen(1980)의 지수 함수적인 관계식을 이용하지 않고 다른 함수 관계식으로 정의한 방법이 Bradbury *et al.*(1988), Bradbury and Allsop(1988), Aminti and Franco(1988) 등의 연구자들에 의하여 제시되었다. 이들은 이전의 연구에서는 고려되지 않았던 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭에 대한 영향까지도 고려할 수 있는 경험식을 제시하였다. 특히 이들은 무차원 천단고를 기존의 방법과는 다른 함수 관계식으로 정의하였다. Franco and Cavani(2000)는 여러 종류의 피복재에 대한 새로운 실험 자료를 이용하여 Van der Meer and Janssen(1994)의 방법과 Bradbury *et al.*(1988), Bradbury and Allsop(1988), Aminti and Franco(1988)의 방법을 상호 비교하였다. 비교 결과에 의하면 Van der Meer and Janssen(1994)의 방법보다 Bradbury *et al.*(1988), Aminti and Franco(1988)의 방법이 더 우수한 적용성을 갖는 것으로 나타났다.

이상에서 언급된 바와 같이 월파와 관련된 현상은 관련 변수들 간에 강한 비선형성을 가질 뿐만 아니라 발생 기구가 너무 복잡하여, 이상에서 제시된 경험식들처럼 몇 개의 무차원 변수나 경험상수들의 관계식만을 이용하여 해석하기가 곤란하다. 이는 현재 제시된 여러 종류의 월파량 산정식들 속에는 많은 불확실성이 내포되어 있다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 경사식 해안 구조물에서 발생하는 월파와 관련된 확률변수들의 불확실성을 고려하고자 신뢰성 해석기법을 도입하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 제시된 경험식들을 이용하여 경사식 해안 구조물의 천단고와 허용 월파량의 관계를 확률적으로 해석하는 것이다. 또한 경험식속에 포함된 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영향을 해석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 Bradbury *et al.*(1988)등이 제시한 경험식을 사용하였다. 왜냐하면 상대적으로 예측 정도가 높고, 다른 경험식들에서는 고려할 수 없는 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭에 따른 영향까지도 고려할 수 있기 때문이다. 또한 여러 종류의 피복재와 단면 조건에 대한 경험상수들이 비교적 정확하게 제시되어 있어 사용이 용이하기 때문이다(Aminti and Franco, 1988).

이하에 경사식 해안 구조물에 발생하는 월파 현상을 해석하기 위한 신뢰함수의 수립과정과 신뢰성 해석 방법을 설명하였다.

2. 신뢰함수의 수립

경사식 해안구조물과 불규칙 파랑의 상호작용에 의하여 발생하는 월파량을 올바르게 산정하기 위한 많은 경험식들이 제시되었다. 따라서 이들 기존의 자료를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 월파와 관련된 변수를 많이 포함하고, 예측성이 우수한 경험식을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 왜냐하면 신뢰성 해석도 그 현상과 관련하여 기존에 이루어진 연구 결과를 근본으로 하기 때문이다. 본 연구에서는 Bradbury *et al.*(1988), Bradbury and Allsop(1988), Aminti and Franco(1988) 등이 제시한 경험식을 사용하였다. 이는 이미 전 절에서 언급되었듯이 다른 경험식에서는 고려할 수 없는 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭에 따른 영향을 고려할 수 있기 때문이다. 또한 경험식에 음함수 형태로 포함된 경험상수들의 값이 다양한 피복재의 종류에 대하여 비교적 정확하게 제시되어 있어 사용이 용이하기 때문이다. Bradbury *et al.*(1988), Bradbury and Allsop(1988), Aminti and Franco(1988) 등이 제시한 경험식은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q = aR^{-b} \quad (1a)$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \quad (1b)$$

$$R = \left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 \sqrt{\frac{s_{om}}{2\pi}} \quad (1c)$$

여기서 a 와 b 는 경사식 해안 구조물의 상치 콘크리트 전면에 피복된 피복재의 천단폭, 경사, 그리고 피복재의 종류에 따라 다르게 정의되는 경험상수이며, q 는 단위 폭당 평균 월파량($m^3/s/m$)이다. 또한 g 는 중력가속도, H_s 는 유의파고, s_{om} 은 평균주기에 해당하는 파형경사이다. 따라서 식 (1)은 다른 경험식과 마찬가지로 입사파랑의 파고, 그리고 주기의 영향을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 경험상수를 통하여 피복재의 종류, 경사 그리고 천단폭의 변화에 따른 해석이 가능한 식이다.

식 (1)을 이용하여 신뢰함수를 수립하기 위해서는 파괴 모드에 대한 정의가 명확하게 설정되어야 한다. 본 연구

에서는 경사식 해안 구조물의 천단고를 넘어 해수의 예기치 않는 흐름이 발생하는 상태를 파괴모드로 정의하였다. 이때 현행의 결정론적 설계법에서 사용하는 허용 월파랑의 개념이 도입되었다. 즉, 임의의 천단고를 넘어 발생하는 월파랑이 허용 월파랑을 초과하는 상태를 파괴상태로 정의하였다. 이는 신뢰성 해석의 결과를 현행의 결정론적 설계법과 직접적으로 연결시키기 위함이다. 이와 같은 개념하에 식 (1)에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 신뢰함수의 비선형성의 정도가 먼저 파악되어야 올바른 해석방법을 선택할 수 있다. 이미 1절에서 언급된 바와 같이 월파현상은 강한 비선형성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 해석이 가능한 AFDA (Approximate Full Distribution Approach)를 사용하였다. 이는 월파 현상과 같이 강한 비선형성을 갖는 문제에 대한 해석의 정도가 높을 뿐만 아니라 정규분포가 아닌 극치 분포와 같은 임의의 분포함수에 대한 적용성도 우수하기 때문이다. 또한 신뢰함수의 형태에 따른 해석결과의 차이가 없다. 즉, 식 (1)의 관계를 만족하도록 신뢰함수를 수립하게 되면 모든 수학적 함수식은 동일한 결과를 갖게 된다. 그러나 FMA(First-order Mean value Approach)에서는 함수식의 형태 차이에 따른 결과의 차이가 발생되므로 이에 대하여 주의하여야 한다. 앞에서 정의된 파괴 모드를 사용하게 되면 다음 식 (2)와 같이 신뢰함수, f 를 정의할 수 있다.

$$f = \ln(C_L - h) - \left(1 + \frac{3}{4b}\right) \ln H_s + \frac{1}{4} \left(1 + \frac{1}{b}\right) \ln \left(\frac{s_{om}}{2\pi}\right) + \frac{1}{2b} \ln \left(\frac{q_a}{a\sqrt{g}}\right) \quad (2)$$

Fig. 1에 제시된 바와 같이 C_L 은 바닥면으로부터 구조물의 천단고까지의 연직거리이고, h 는 구조물 전면의 해수면 높이 그리고 q_a 는 허용 월파랑이다. 따라서 식 (2)의 신뢰함수는 천단고와 허용 월파랑의 관계를 규정하는 함수식이 된다. 즉, 경사식 해안 구조물에 허용 월파랑을 초과하는 사건이 발생될 확률을 산정할 수 있는 함수식이다. 특히 식 (2)는 식 (1)에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려할 수 있을 뿐만 아니라 해수면의 높이를 양함수적으로 고려할 수 있도록 식 (1)의 양변에 대수를 취하여 본 연구에서 유도된 식이다. 왜냐하면 이미 앞에서 언급되었듯이 본 연구에서 사용할 AFDA 신뢰성 해석기법에서는 설계점에서 신뢰함수의 미

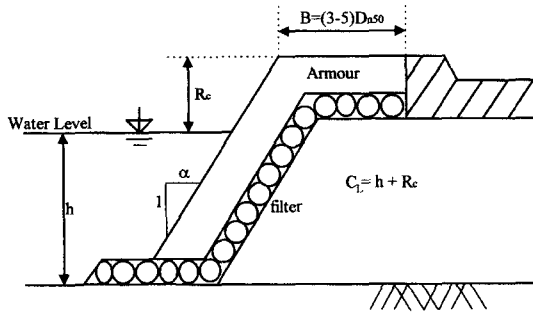


Fig. 1. Definition sketch for the sloped-coastal structures.

분계수를 필요로 하기 때문이다. 즉 식 (1)을 식 (2)와 같이 변형하지 않으면 모든 변수를 확률변수로 고려하는 것이 대단히 어렵게 된다. 따라서 식 (2)에 정의된 모든 확률변수의 통계적 특성과 분포함수를 올바르게 정의하면 허용 월파량을 초과하는 파괴확률을 천단고의 함수로 정확하게 산정할 수 있다.

3. 허용 월파량에 따른 파괴확률 산정

식 (2)의 신뢰함수를 이용하여 AFDA 신뢰성 해석기법을 적용하기 위해서는 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 통계적 특성과 분포함수가 정의되어야 한다. 본 연구에서 사용한 각 확률변수의 특성들을 Table 1에 제시하였다. Table 1에 제시된 단면 및 파랑조건은 임의로 설정되었지만, 각각의 확률변수들은 기존의 결정론적 설계법에서 일반적으로 적용되고 있는 대표적인 값들로 부여하였다. 비록 본 연구의 결과가 일반적인 적용성을 갖는다고 볼 수는 없지만, 월파와 관련하여 설계에서 결정되어야 할 설계 변수들의 결정 과정에 신뢰성 해석기법을 접목시키는 방법을 제시하고자 하는 근본적인 목적은 충분히 달성될 수 있도록 하였다.

Table 1에서 쉽게 알 수 있듯이 신뢰함수에 포함된 모

Table 1. Statistical properties and distribution functions of each random variables in Eq. (2)

No.	X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
1	$H_s(m)$	4.5	0.16	Gumbel
2	s_{om}	0.04	0.25	Normal
3	a	various	0.10	Normal
4	b	various	0.08	Normal
5	$q_a(m^3/s/m)$	various	0.10	Normal
6	$h(m)$	6.5	0.10	Normal

든 변수들을 확률변수로 고려하였다. 즉, 파고와 주기/파형경사, 수심, 그리고 허용 월파량은 양함수적으로, 경사각, 천단고, 그리고 피복재의 종류 등은 경험상수를 통하여 음함수적으로, 경사식 해안 구조물에서 발생하는 월파와 관련된 대부분의 변수들을 고려하였다. 특히 현행의 결정론적 설계법에서 해안 구조물의 천단고 결정에 중요하게 이용되고 있는 허용 월파량이 확률변수로 도입되었는데, 이는 본 연구의 결과를 현행의 결정론적 설계법과 연계하기 위함이다. 본 연구에서 입사파랑의 파고는 극치분포의 하나인 Gumbel 분포를 사용하였다. 파고의 불확실성은 Burcharth(1992), Van der Meer(1995) 등의 기존 자료를 이용하여 설정하였다. 또한 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였으며, 각 확률변수의 불확실성도 여러 관련 연구에서 제안된 범위에서 설정하였다. 특히 경사각이나 피복재의 종류 그리고 천단고에 따라 다르게 정의되는 경험상수인, a 와 b 의 불확실성은 Aminti and Franco(1988)에 제시된 경험식과 관련 자료의 상관성으로부터 설정하였다. 한편 본 연구에서 유도된 신뢰함수에는 허용 월파량의 개념이 포함되었는데 이는 현행 설계법과의 연관성을 갖도록 하기 위함이다. 현행의 설계법에서는 배후지의 중요도 및 이용 상태 그리고 피해한계 등에 따라 허용 월파량을 설계 기준서에 제시하고 있다. 그러나 이와 같이 설정된 허용 월파량의 크기도 연구자에 따라 약간씩 다르게 설정되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 영향을 고려하기 위하여 허용 월파량도 확률변수로 고려하였다. 마지막으로 경사식 해안 구조물에서 발생하는 월파량의 산정을 위한 해수면의 기준은 일반적으로 삭망최고만조위(H.W.L)이다. 그러나 실제 해수면은 이와 같은 천문조뿐만 아니라 폭풍이나 지진에 의한 해일 및 지구 온난화에 따른 해수면 상승과 같은 기상조도 함께 고려해야 한다. 따라서 수심의 불확실성은 이를 근거로 설정하였다. 이상과 같이 신뢰성 해석을 위한 관련 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수가 비교적 올바르게 설정되었다고 판단된다. 따라서 이하에서는 이상의 자료를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 천단고의 변화에 따른 허용 월파량을 초과하는 사건의 발생확률, 즉, 파괴확률을 우리나라에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 두개의 피복재에 대하여 수행하였다. 하나는 사석재이고 다른 하나는 TTP 피복재이다. 해석에 사용된 피복재의 종류에 따른 경험상수, a 와 b 의 평균을 Table 2에 제시하였다. 또한 허용 월파량은 항만설계기준서에 있는 자료 중 배후지의 중요도를 고려한 월파량을 사용하

Table 2. Mean values of the empirical coefficients, a, and b of Eq. (1) (After Aminti and Franco, 1988)

Armour type	Rock		TTP		
	Slope	1:2	1:4/3	1:2	1:4/3
$B=3D_{n50}$	a	1.67E-8	5.05E-8	1.88E-8	5.59E-8
	b	2.41	3.10	3.08	2.81
$B=3D_{n50}$	a	1.85E-7	6.83E-8	1.13E-8	1.68E-8
	b	2.30	2.65	3.80	3.02

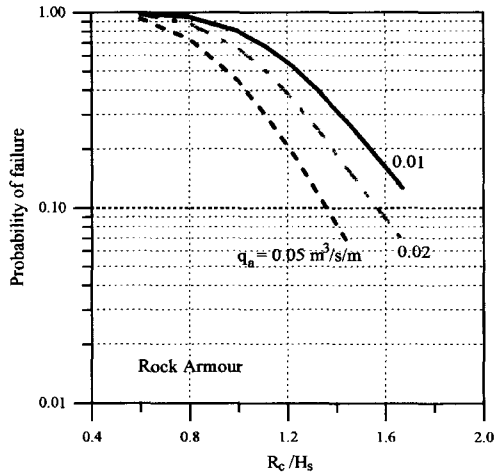


Fig. 2. Probability of failure of rock armour with respect to dimensionless crest height for the various allowable overtopping discharges.

였다. Fig. 2는 경사 1:4/3의 경우 사석재에 대한 파괴확률을 제시한 것이다. 즉, 허용 월파량을 초과하는 월파의 발생사상을 파괴확률로 정의하여 천단고의 변화에 따라 제시한 것이다. 천단고의 높이는 입사파고의 평균치로 무차원화하였으며, 그 적용범위는 일반적으로 적용되고 있는 0.6에서 1.6으로 설정하였다. 그림에서 쉽게 볼 수 있듯이 천단고가 높아짐에 따라 파괴확률이 작게 나타나고 있다. 또한 동일한 천단고에서 허용 월파량에 따른 파괴확률의 차이도 나타나고 있다. 이를 더 자세히 해석하기 위하여 Fig. 3에 허용 월파량에 따른 파괴확률을 제시하였다. 동일한 천단고에서 허용 월파량이 증가함에 따라 파괴확률은 지수함수적으로 감소하고 있다. 따라서 현행의 설계법에서는 고려할 수 없는 확률변수들의 불확실성을 고려하면서 파괴확률을 정량적으로 산정할 수 있다. 즉, 설계시 천단고와 허용 월파량의 관계가 파괴확률이라는 개념에 의하여 정량화될 수 있다. 이는 천단고와 같은 설계변수의 결정이 합리적으로 이루어 질 수 있다는 것을 의미한다. 동일한 조건에서 TTP 피복재에 대한 결과를 Fig. 4와

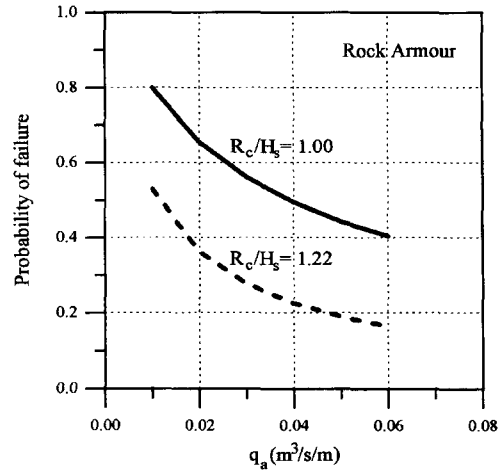


Fig. 3. Probability of failure of rock armour with respect to allowable overtopping discharge for dimensionless crest heights, 1.00 and 1.22.

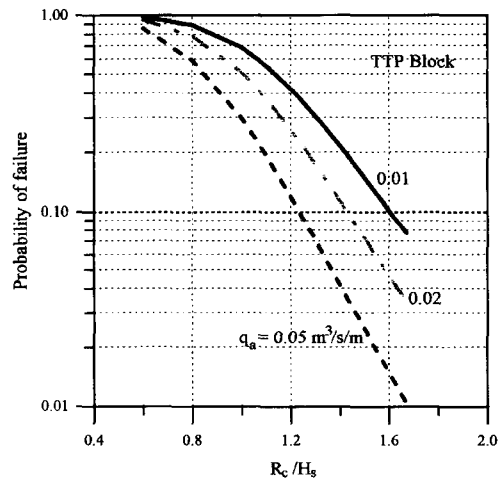


Fig. 4. Probability of failure of TTP block with respect to dimensionless crest height for the various allowable overtopping discharges.

Fig. 5에 제시하였다. 전반적인 경향이 거의 동일하게 나타나고 있으나 TTP 경사면에서의 파괴확률이 작게 산정되고 있다. 이를 자세히 해석하기 위하여 Fig. 6에 피복재의 종류에 따른 파괴확률을 무차원 천단고의 함수로 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 TTP 보다 사석재를 사용한 경사면에서 파괴확률이 더 크게 나타나고 있다. 이는 경사면에 사석재를 거치한 경우보다 TTP를 거치한 경우에 더 작은 월파량이 나타난다는 것을 의미한다. 이는 피복재의 종류에 따라 다른 공극에 의한 소파성능에 기인한다고 판단된다. 유사하게 Fig. 7은 피복재의 중

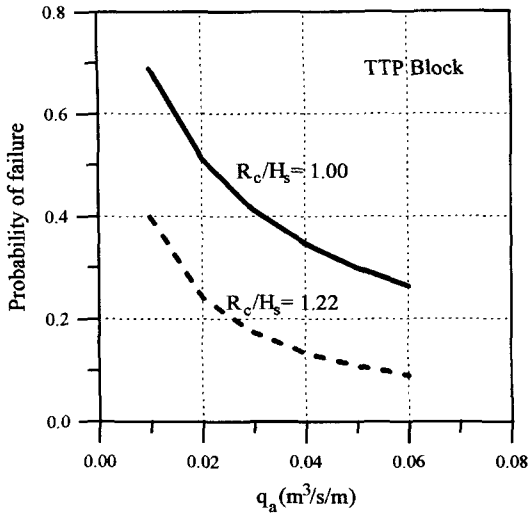


Fig. 5. Probability of failure of TTP block with respect to allowable overtopping discharge for two dimensionless crest heights, 1.00 and 1.22.

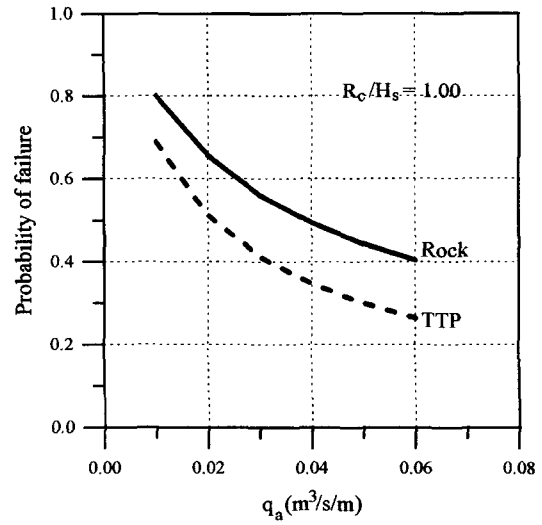


Fig. 7. Comparison of probability of failure of rock armour with that of TTP block for the dimensionless crest height, 1.00.

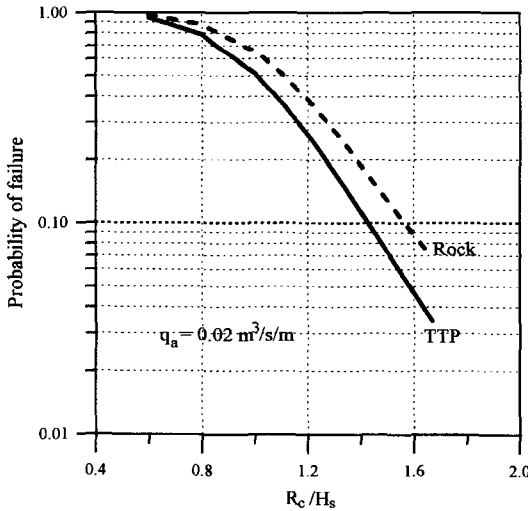


Fig. 6. Comparison of probability of failure of rock armour with that of TTP block for the allowable overtopping discharge, 0.02 m³/s/m.

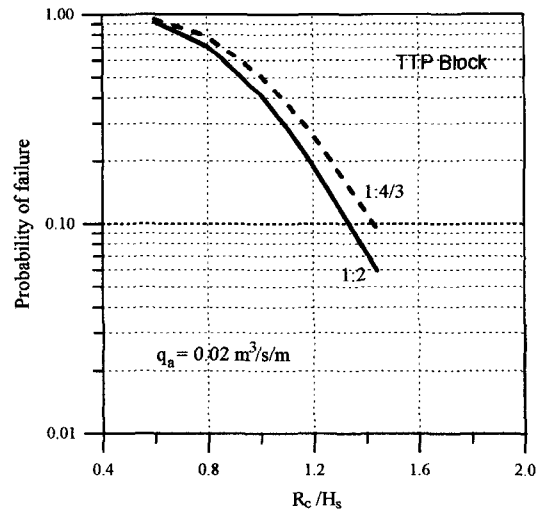


Fig. 8. Comparison of probabilities of failure of TTP block with structure slopes.

류에 따른 파괴확률을 허용 율파량의 함수로 제시한 것이다. 마찬가지로 동일한 허용 율파량에서 사석재가 더 큰 파괴확률을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 이미 Owen(1980), SPM(1985), Van der Meer(1995) 등의 연구자들에 의하여 언급된 바 있다. 따라서 이들 연구자들은 피복재의 종류에 따른 영향을 고려하기 위하여 공극에 따른 감소율의 개념을 경험식에 도입하려는 노력을 시도하였다.

한편 해안 구조물의 경사가 변화에 따른 영향이 해석

되었다. Fig. 8은 허용 율파량, $q_a = 0.02$ m³/s/m인 경우에 TTP 피복재의 천단고 변화에 따른 파괴확률을 제시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 일정한 조건에서 구조물의 경사가 완만해짐에 따라 파괴확률은 작아진다. 즉, 경사가 완만해지면 율파량이 감소한다는 기존의 연구 결과와 일치하는 경향을 나타내고 있다. 마지막으로 천단폭의 변화에 따른 해석을 수행하였다. 본 입사파랑의 조건에서 피복재의 구조적 안전성을 만족하는 TTP 피복재의 크기를 Hudson의 공식을 이용하여 산정하면 대표입경은 약 1.6 m

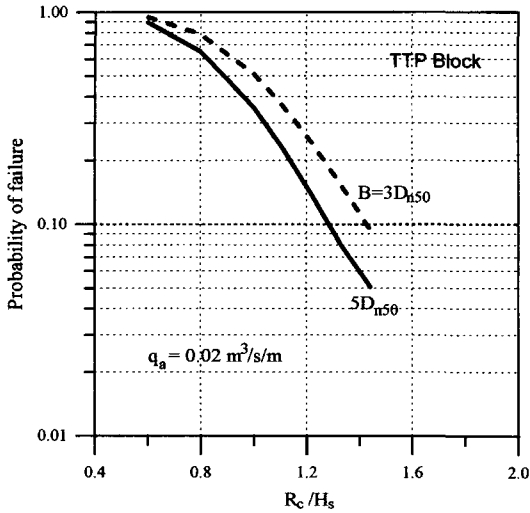


Fig. 9. Comparison of probability of failure of TTP block with crest width in front of concrete cap.

이다. 현행의 설계에서는 천단면상 상치콘크리트 전면에 약 3개의 TTP가 일반적으로 거치된다. 많은 연구자들에 의하면 상치 콘크리트 전면에 거치되는 피복재의 천단폭이 달라짐에 따라 월파량의 거동이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 영향이 해석되었다. 경사 1:4/3, 허용 월파량, $q_a = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 에 대한 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 결과를 보면 상치 콘크리트 전면의 피복재 천단폭이 넓어짐에 따라 주어진 허용 월파량을 초과할 파괴확률이 작게 산정된다. 이는 허용 월파량을 초과하는 월파가 발생하여도 상치 콘크리트 전면의 피복재 천단폭을 적절히 이용하여 파괴확률을 감소할 수 있다는 의미를 갖게 된다. 즉, 천단고와 천단폭을 적절히 조정하면 월파에 의한 배후지의 이용성을 증대시킬 수 있다.

이상의 결과에서 알 수 있었던듯이 전반적으로 월파와 관련하여 나타나는 제반 특성들을 본 연구에서도 잘 묘사할 수 있다. 그러나 기존의 연구 결과에서는 규명할 수 없었던 허용 월파량을 초과하는 파괴확률들이 정량적으로 산정되었다. 즉, 본 연구의 결과를 이용하면, 설계변수인 천단고를 결정할 때, 각 변수의 불확실성이 고려된 확률적인 개념을 이용하여 설계의 효율성을 높일 수 있다.

4. 민감도 분석

경사식 해안 구조물에 발생하는 월파와 관련된 확률변수들의 평균적인 거동의 변화에 따른 파괴확률을 전 절에서 정량적으로 해석하였다. 즉, 허용 월파량을 초과하

Table 3. Influence coefficients of the reliability function of Eq. (2) calculated by AFDA

X_i	$\alpha_{X_i}^2$ (%)
H_s	55.1
s_{om}	10.1
a	0.4
b	15.9
q_a	0.4
h	18.1

는 파괴확률을 천단고, 경사 그리고 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭 변화에 따라 산정하였다. 해석 결과에 의하면 전반적인 거동특성이 기존의 실험 결과와 동일한 거동특성을 갖는 것으로 판단되었다. 따라서 이하에서는 식 (2)의 신뢰함수에 포함된 여러 확률변수들의 불확실성에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 1:4/3의 경사면에 2층으로 피복된 TTP 피복재를 대상으로 수행되었다. 이때 허용 월파량, $q_a = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 이고 무차원 천단고, $R_c/H_s = 1.25$ 이다. 민감도 분석은 Table 1에 제시된 값을 기준으로 각 확률변수의 변동계수를 변화시키면서 수행되었다. 민감도 분석을 수행하기 전에 먼저 AFDA 신뢰성 해석기법에서 얻을 수 있는 영향계수의 값을 Table 3에 제시하였다. 신뢰성 해석에서 영향계수란 파괴확률에 미치는 각 확률변수의 영향 정도를 나타내기 위하여 도입된 개념이다. Table 3에 의하면 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 파고이며, 그 뒤로 수심, 경험상수, b , 그리고 파형경사의 순으로 나타나고 있다. 반면 허용 월파량이나 경험상수, a 의 영향정도는 매우 미미한 것으로 나타났다. 따라서 허용 월파량이나 경험상수, a 에 대한 민감도 분석은 수행하지 않았다.

먼저 파고의 불확실성에 따른 민감도 분석을 수행하기 위해서는 Gumbel 분포에 포함된 변수들이 먼저 산정되어야 한다. 이는 변동계수가 변화함에 Table 4에 제시된

Table 4. Estimated parameters of Gumbel distribution with coefficient of variation

COV _{H_s}	Parameters of Gumbel distribution*	
	κ	λ
0.05	5.700	4.399
0.10	2.850	4.297
0.16	1.781	4.176
0.20	1.425	4.095
0.30	0.950	3.892

* $F(H_s) = 1 - e^{-e^{-\kappa(H_s - \lambda)}}$

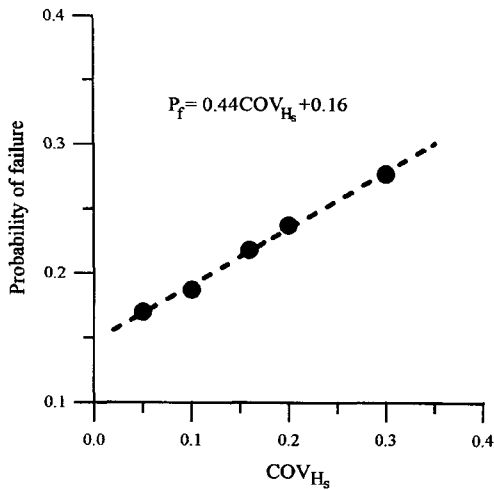


Fig. 10. Variation of probability of failure with coefficient of variation of significant wave height.

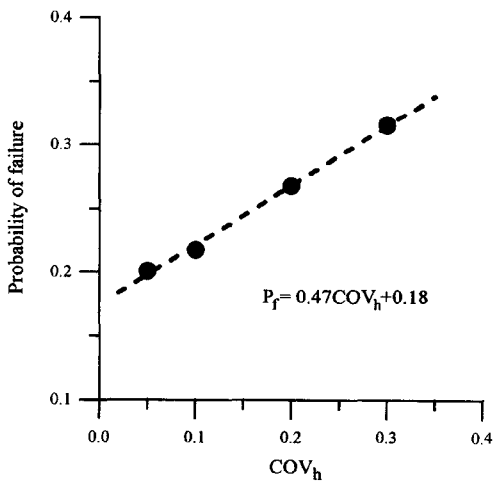


Fig. 11. Variation of probability of failure with coefficient of variation of sea level.

바와 같이 Gumbel 분포의 거동특성을 지배하는 변수들이 다르게 정의되기 때문이다. 이와 같은 과정을 거쳐 계산된 변동계수에 따른 파괴확률의 거동특성을 Fig. 10에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 변동계수, 즉, 불확실성의 크기에 따른 영향이 크게 나타나고 있다. 따라서 해석의 정도를 높이기 위해서는 파괴의 불확실성에 대한 정확한 산정이 필요함을 알 수 있다. 또한 그림에 제시했듯이 파괴확률은 전반적으로 변동계수와 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이미 제 2절에서 언급되었듯이 식 (2)의 신뢰함수는 기상조의 발생에 따른 해수면의 불확실성을 양함수적으로 고려하기 위하여 본 연구에서 유도된 식이

다. Fig. 11은 경사식 해안 구조물 전면의 해수면 불확실성에 따른 해석 결과이다. 앞에서 언급된 파고 못지않게 해수면의 정확한 산정이 필요함을 알 수 있다. 따라서 월파량을 산정할 때 현행의 설계법에서 적용되는 삭망평균 만조위에 지진이나 폭풍 그리고 지구 온난화에 의한 영향까지도 고려하여 해석할 필요성이 있다고 판단된다. 한편 식 (1)에는 경험식에 포함되지 않은 여러 관련변수들을 고려하기 위하여 경험상수, a 와 b 가 포함되어 있다. 이 두 경험상수 중 월파량의 정량적인 산정에 영향을 주는 변수가 b 임을 알 수 있었다. 따라서 b 의 불확실성에 따른 영향이 해석되었다. Fig. 12에 의하면 b 에 대한 불확실성의 영향도 상당히 크게 나타나고 있다. 따라서 이와 같은

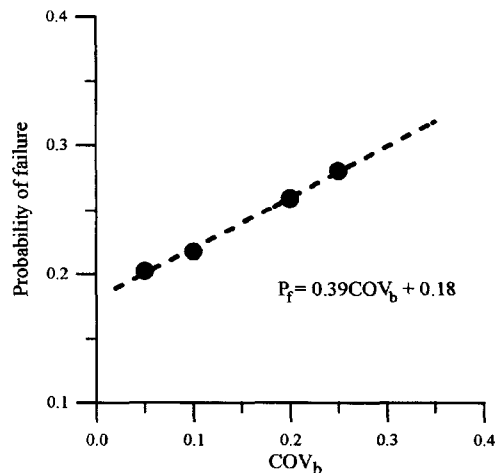


Fig. 12. Variation of probability of failure with coefficient of variation of empirical coefficient, b.

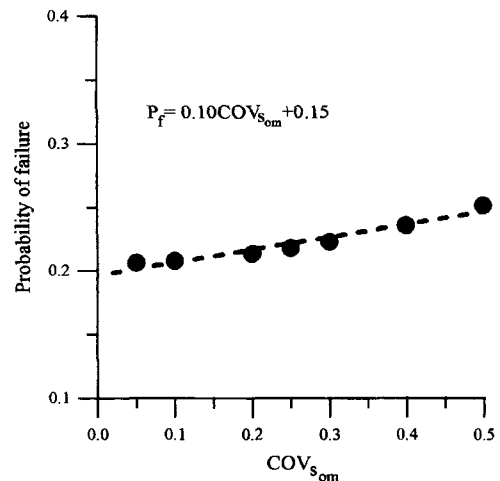


Fig. 13. Variation of probability of failure with coefficient of variation of wave steepness.

경험상수를 올바르게 결정하기 위해서는 기존의 자료뿐만 아니라 광범위한 조건에서의 새로운 자료들을 이용한 경험상수 결정을 위한 추가적인 노력이 필요하다. 마지막으로 입사파랑의 주기에 따른 영향을 살펴보기 위하여 파형경사의 변동계수에 따른 영향을 해석하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 파형경사의 영향은 상대적으로 앞에서 언급된 다른 확률변수들의 영향보다 작게 나타나고 있다. 그러나 이에 대한 연구는 더 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 확률변수의 불확실성을 고려할 수 있는 신뢰성 해석기법을 이용하여 경사식 해안 구조물에 발생하는 월파현상을 해석하였다. 현행의 결정론적 설계법에서 사용되는 허용 월파량의 개념을 도입하여 구조물의 천단고 변화에 따른 파괴확률을 산정하였다. 상대적으로 많은 관련 변수를 고려할 수 있을 뿐만 아니라 예측능력이 좋다고 판단되는 경험식을 이용하여 신뢰함수를 유도하였다. 경험식에 포함된 모든 관련 변수들이 확률변수로 고려될 수 있도록 신뢰함수를 유도하였다. 신뢰성 해석에서 파고의 분포함수는 극치분포를 이용하였으며, 다른 확률변수들은 정규분포로 가정하였다. 또한 각 확률변수의 불확실성을 나타내는 변동계수들은 여러 연구지들에 의하여 제시된 자료들을 이용하여 설정하였다. 신뢰성 해석은 AFDA 기법을 이용하였는데, 이는 월파 현상과 같이 강한 비선형성을 갖는 문제에 대한 해석정도가 높기 때문이다. 신뢰성 해석에서는 경사식 해안 구조물의 천단고와 허용월파량의 관계를 확률적으로 해석하였다. 즉, 허용 월파량을 초과하는 파괴확률을 천단고의 함수로 산정할 수 있었다. 피복재의 종류와 구조물 전면의 경사에 따른 파괴확률의 차이도 해석하였다. 특히 본 연구에서는 다른 경험식에서는 고려할 수 없는 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭 변화에 대하여도 해석하였다.

해석결과에 의하면 천단고가 높아짐에 따라 허용 월파량을 초과할 파괴확률은 작게 산정되었다. 또한 동일한 천단고에서 허용 월파량이 증가하면 파괴확률이 작게 산정된다. 결정론적 설계법에서도 동일한 결과를 얻을 수 있지만 신뢰성 해석, 즉, 파괴확률의 개념에 의해 상호 정량적인 해석이 가능하게 되었다. 이는 천단고와 허용 월파량의 합리적인 설정을 가능하게 한다. 특히 본 연구에서는 우리나라에서 가장 많이 사용되는 피복재인 사석재

와 TTP의 두 종류에 대한 파괴확률을 산정하였다. 해석 결과에 의하면 사석재의 파괴확률이 TTP 보다 큼을 알 수 있었다. 이는 피복재가 갖는 공극에 따른 소파성능에 기인한다고 판단된다. 또한 동일한 조건에서 구조물 전면의 경사가 클 수록 파괴확률은 작아진다. 특히 상치 콘크리트 전면에 거치된 피복재의 천단폭 변화에 따른 해석에서 천단폭이 클수록 파괴확률은 작게 산정되었다. 마지막으로 경험식에 포함된 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영향을 해석하였다. 한편 신뢰성 해석에서 얻어지는 영향계수를 이용하여 민감도 분석 대상 확률변수를 선정하였다. 경사식 해안 구조물의 월파현상과 관련하여 가장 민감하게 영향을 주는 확률변수는 파고, 해수면의 높이, 경험상수, b 그리고, 파형경사의 순으로 나타났다. 변동계수의 크기로 부여한 불확실성에 따른 파괴확률은 선형적으로 거동함을 알 수 있었다. 따라서 월파 현상에 대한 해석에서는 파고나 해수면의 높이를 비교적 다른 확률변수들 보다 정확하게 산정할 필요가 있다.

이상의 결과에서 알 수 있었듯이 전반적으로 월파와 관련하여 나타나는 제반 특성들을 본 연구에서도 잘 묘사할 수 있었다. 특히 기존의 연구 결과에서는 규명할 수 없는 허용 월파량을 초과하는 파괴확률들을 정량적으로 산정하였다. 즉, 설계시 천단고를 결정할 때 확률적인 개념을 가미함으로써 설계의 효율성을 높일 수 있다. 그러나 파고의 분포함수에 따른 영향, 그리고 입사파랑의 변화에 따른 영향 등이 앞으로 더 연구되어야 한다.

참고문헌

- ACES(Automated Coastal Engineering System), 1992. Department of Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississippi 39180-6199, Version 1.07
- Allsop, N.W.H., and Franco, C., 1992. MAST G6-S Coastal Structures Topic R3: Performance of rubble mound breakwaters, *Paper 3.12 to G6-S Final Workshop*.
- Aminti, P., and Franco, L. 1988. Wave overtopping on rubble mound breakwaters, *Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 770-781.
- Beseley, P.B., and Allsop, N.W.H., 2000. Wave overtopping of coastal and shoreline structures, *Handbook of Coast. Engrg.*, Herbich(ed.), pp. 6.1-6.21.
- Bradbury, A.P., and Allsop, N.W.H., 1988. Hydraulic effects of breakwater crown walls, *Design of Breakwaters ICE*, London, pp. 385-396.

- Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H., and Stephens, R.V., 1988. Hydraulic performance of breakwater crown wall, *Rep. Ser. 146*, Hydraulic Research, Wallingford, U.K., pp. 385-396.
- Burcharth, H.F., 1992. Reliability-based design of coastal structures: Structural integrity, *Proc. sShort course, 23rd. Int. Coast. Engrg. Conf.*, Special Lecture, ASCE, pp. 511-545.
- De Rouck, J., Verdonck, R., Troch, P., Van Damme, L., Schluter, F., and De Ronde, J., 1999. Wave run-up and overtopping: Prototype versus scale models, MAST III- OPTICREST, *A tech. Paper, MAS3-CT97-0116*.
- De Waal, J.P., and Van der Meer, J.W., 1992. Wave run-up and overtopping on coastal structures, *Proc. 23rd. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1759-1771.
- Franco, L., and Cavani, A., 2000. Overtopping response of Core-Locs, Tetrapods and Antifer cubes, *Coastal Structures'99*, Losada(ed.), pp. 383-387.
- Hebsgaard, M., Sloth, P., and Juhl, J., 1998. Wave overtopping of rubble mound breakwaters, *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2235-2248.
- Hu, S-L.J., and McCauley, J.L., 1997. Estimation of wave overtopping rates for irregular waves, *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, **123**(5), pp. 266-273.
- Juhl, J., and Sloth, P., 1994. Wave overtopping of breakwaters under oblique waves, *Proc. 24th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1182-1196.
- Owen, M.W., 1980. Design of seawalls allowing for wave overtopping, *Rep. EX924*, HR Wallingford, Wallingford, U.K.
- Saville, T. Jr., 1955. Laboratory data on wave runup and overtopping on shore structures, *Tech. Memo No. 64*, Beach Erosion Board.
- Shankar, N.J., and Jayaratne, M.P.R., 2003. Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures, *Ocean Engrg.*, **30**, pp. 221-238.
- SPM(Shore Protection Manual), 1984. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC.
- Van der Meer, J.W., 1995. Conceptual design of rubble mound breakwaters, *Advances in Coast. and Oc. Engrg.*, pp. 221-315.
- Van der Meer, J.W., and Janssen, J.P.F.M., 1994. Wave runup and wave overtopping at dikes and revetments, *Delft Hydraulic Pub. No. 485*.
- Van der Meer, J.W., and Stam, C.M., 1992. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures, *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, **118**(5), pp. 534-550.
- Weggel, J.R., 1976. Wave overtopping equation, *Proc. 15th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2737-2755.

Received May 30, 2003

Accepted October 7, 2003