

치오름의 신뢰성 해석에 대한 파고-주기결합분포의 영향 Influence of Joint Distribution of Wave Heights and Periods on Reliability Analysis of Wave Run-up

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 경사식 방파제에서 파랑과 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 치오름에 대한 파고주기결합분포의 영향을 해석할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 제시되었다. 치오름과 관련된 파괴모드의 정의에 따라 수면의 불확실성에 따른 영향을 해석할 수 있는 신뢰함수가 유도되었다. 특히 신뢰함수에 주기가 하나의 확률변수로 포함되어, 주기의 통계적 특성과 분포함수가 직접적으로 고려될 수 있을 뿐만 아니라 평균주기에 따른 파고분포의 거동특성이 조건부파고분포에 의해 올바르게 고려될 수 있었다. 주기의 영향을 받지 않는 유의파고의 극치분포를 이용한 신뢰성 해석의 결과와 비교하여, 파고-주기결합분포를 이용한 신뢰성 해석이 극치분포를 이용한 신뢰성 해석보다 더 큰 파괴확률을 추정한다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 중요한 구조물인 경우, 극치분포를 이용하여 경사식 방파제의 마루높이가 결정되더라도 단일 폭풍사상에 대하여는 파고-주기결합분포를 이용한 추가적인 해석이 필요하다. 한편 주기의 분포함수에 영향을 주는 계수에 따른 신뢰지수의 거동특성이 해석되었는데, 이에 따른 영향은 매우 작은 것으로 나타났다. 그러나 평균주기에 의한 파고분포의 거동에 따른 신뢰지수의 차이는 큰 것으로 나타났다. 이는 파괴확률에 미치는 주기의 영향이 파고분포를 통하여 주로 발생된다는 것을 의미하는 것이다. 마지막으로 수면 변동 효과를 고려한 합리적인 마루높이 산정을 위해 마루높이의 변화에 따른 파괴확률을 산정하였다.

핵심용어 : 치오름, 신뢰성 해석, 경사식 방파제, 마루높이, 파고-주기결합분포

Abstract : A reliability analysis model for studying the influence of joint distribution of wave heights and periods on wave run-up is presented in this paper. From the definition of failure mode related to wave run-up, a reliability function may be formulated which can be considered uncertainties of water level. In particular, the reliability analysis model can be directly taken into account statistical properties and distributions of wave periods by considering wave period in the reliability function to be a random variable. Also, variations of wave height distribution conditioned to mean wave periods can be taken into account correctly. By comparison of results of additional reliability analysis using extreme distributions with those resulted from joint distribution of wave height and periods, it is found that probabilities of failure evaluated by the latter is larger than those by the former. Although the freeboard of sloped-breakwater structures can be determined by extreme distribution based on the long-term measurements, it may be necessary to investigate additionally into wave run-up by using the present reliability analysis model formulated to consider joint distribution of a single storm event. In addition, it may be found that the effect of spectral bandwidth parameter on reliability index may be little, but the effect of wave height distribution conditioned to mean wave periods is straightforward. Therefore, it may be confirmed that effects of wave periods on the probability of failure of wave run-up may be taken into account through the conditional distribution of wave heights. Finally, the probabilities of failure with respect to freeboard of sloped-breakwater structures can be estimated by which the rational determination of crest level of sloped-breakwater structures may be possible.

Keywords : wave run-up, reliability analysis, sloped-breakwater structures, freeboard, joint distribution of wave height and periods

1. 서 론

경사식 해안 구조물의 마루높이를 합리적으로 결정하기 위해서는 먼저 해당 구조물의 전면에서 파랑과 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 처오름의 크기 등, 이와 관련된 문제에 대한 이해가 선행되어야 한다. 현재까지 처오름의 크기를 산정하기 위한 많은 연구가 수행되었는데, 이들 대부분은 주로 수리모형실험을 통하여 이루어졌다. 이는 처오름과 관련된 현상이 매우 복잡한 거동 특성을 보이기 때문이다. 즉, 처오름은 입사파랑과 관련된 변수뿐만 아니라 구조물의 기하학적인 특성이 상호 복합적으로 작용하여 나타난다. 많은 연구자들이 각각 수행한 실험 자료를 근거로 여러 종류의 경험식들을 제시하였는데, 이는 실험에서 얻어진 처오름의 크기를 관련된 변수들의 함수로 정의하는 방법이 다르기 때문이다. 처오름과 관련된 기존 산정식들에 대한 적용성과 제약성에 대한 내용이 이(2003)에 의하여 잘 조사되었는데, 대부분의 연구자들은 실용적인 관점에서 처오름의 크기를 유의 입사파고 및 쇄파계수(surf similarity parameter)의 함수로 정의하고 있다. 따라서 산정식은 파고 및 주기 그리고 해안 구조물의 경사와는 직접적인 관계를 갖게 된다. 그러나 경사면의 특성, 예로 공극의 정도에 따른 영향들은 직접적으로 고려하지 못하고 임의의 관련 변수들을 통하여 간접적으로 고려하고 있다. 따라서 처오름의 크기를 산정하기 위하여 제안된 각각의 경험식들에는 많은 불확실성들이 필연적으로 내포될 수 밖에 없다. 이에 따른 문제를 해결하기 위하여 이(2003)는 Van der Meer and Stam(1992)에 의하여 제시된 산정식을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 그러나 이(2003)의 연구에서는 신뢰함수를 수립하는 과정에 주기에 따른 영향을 심해파장으로 정의되는 파형경사로 고려하였다. 즉, 주기와는 독립적으로 파고의 분포함수에 따른 영향을 중점적으로 고찰하여 처오름과 관련된 특성, 즉, 파괴확률, 영향계수, 그리고 각 변수들의 민감도 분석을 수행하였다. 해석 결과에 의하면 파고의 분포함수가 처오름의 신뢰성 해석에서 가장 중요한 역할을 하며, 주기의 영향을 간접적으로 고려한 파형경사의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 그러나 Ahrens(1981), Grune(1982), Ahrens and Titus(1985), Van der Meer and Stam(1992), De Rouck *et al.*(1999), Shankar and Jayaratne(2003) 등 많은 연구자들에 의하면 처오름에서 주기가 상당히 중요한 역할을 하는 것으로 언급되고 있다. 따라서 주기에 대한 영향을 더 자세히 해석할 필

요성이 있다고 생각한다. 주기에 대한 영향을 자세히 해석하기 위해서는 다음의 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 하나는 신뢰성 해석을 위해 수립되는 신뢰함수에 주기가 반드시 하나의 확률변수로 취급되어 양함수적으로 포함되어야 한다. 이는 주기의 통계적 특성과 분포함수가 직접적으로 신뢰성 해석에 고려된다는 것을 의미하는 것이다. 다른 하나는 주기에 따라 파고의 분포함수가 다르게 나타나는 현상이 고려될 수 있어야 한다. 이 두가지 요구 조건을 만족하기 위해서는 파고-주기에 대한 결합분포함수가 반드시 이용되어야 한다.

본 연구에서는 이(2003)에서 해석하지 못하였던 파고-주기결합분포를 신뢰성 해석에 직접적으로 도입하여 그에 따른 영향을 자세히 해석하였다. 신뢰함수는 Losada(1990)에 의하여 제시된 산정식을 이용하여 수립되었는데, 수면의 변동효과를 고려할 수 있도록 하였다. 신뢰함수는 두 가지 접근방법으로 수립되었다. 하나는 파형경사를 이용하여 간접적으로 주기의 효과를 고려하는 방법이고, 다른 하나는 주기를 하나의 확률변수로 고려하는 방법이다. 따라서 전자의 해석법에서는 주기와는 독립적인 유의파고의 극치분포가 적용되었으며, 후자의 해석에서는 Longuet-Higgins(1983)에 의하여 제시된 파고-주기결합분포함수를 이용하였다. 즉, 파고-주기결합분포를 이용하면 주기의 분포함수를 얻을 수 있으며, 또한 임의의 주기에 대한 파고의 조건분포함수를 얻을 수 있다. 따라서 파고의 분포함수가 대표주기에 따라 다르게 나타나는 현상을 해석할 수 있다. 먼저 이(2003)의 해석에서와 같이 파형경사와 극치분포를 이용하는 해석법의 결과와 파고-주기결합분포를 이용하는 해석법의 결과를 비교하였다. 이는 파고분포에 미치는 주기의 영향을 살펴보기 위함이다. 다른 한편으로는 파고-주기결합분포를 이용하는 신뢰성 해석법이 상대적으로 복잡한 과정을 필요로 하기 때문에, 파형경사를 이용하는 방법의 실용적인 관점에서의 접근법에 대한 적용성을 알아보기 위함이다. 또한 주기 및 파고의 분포함수에 영향을 주는 변수들의 거동에 따른 신뢰성 해석이 수행되었다. 마지막으로 제체의 마루높이에 따른 파괴확률이 산정되어, 마루높이를 합리적으로 결정할 수 있는 방법이 제시되었다.

2. 신뢰함수의 수립

전절에서 언급된 목적에 따라 본 연구에서는 Losada(1996)의 처오름 산정식을 이용하여 신뢰성 해석을 위한 신뢰

함수가 수립되었다. 신뢰함수는 두 가지 접근방법으로 수립되었는데, 하나는 심해 파형경사를 이용하여, 주기의와는 독립적으로 파고분포를 이용하는 방법이고, 다른 하나는 주기를 양함수적으로 신뢰함수에 포함하는 방법이다. 이는 주기의 분포함수를 직접 고려할 수 있을 뿐만 아니라 파고분포의 주기에 따른 영향을 해석할 수 있기 때문이다. 두 접근방법 모두 수면의 변동에 따른 불확실성의 영향도 쉽게 고려할 수 있도록 하였다. 이는 조위나 폭풍해일, 그리고 지구 온난화에 따른 수위 변동성의 불확실성을 정확하게 고려하기 위함이다.

많은 수리모형실험 결과로부터 경사식 방파제에서 해수면을 기준으로 처오름의 크기, R_u 를 산정하기 위하여 Losada(1990)에 의하여 제안된 경험식은 다음 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{R_u}{H} = A_u(1 - e^{-B_u \xi_{om}}) \quad (1)$$

여기서 H 는 입사파고, A_u , B_u 는 피복재의 종류 등 처오름과 관련되나, 산정식 (1)에 포함되지 않은 관련 변수들의 영향을 고려하기 위하여 정의된 경험계수이고, 심해 조건에서의 쇄파계수 $\xi_{om} = \tan \alpha / \sqrt{H/L_{om}}$ 이다. 식 (1)을 이용하여 신뢰함수를 수립하기 위해서는 먼저 파괴모드에 대한 정확한 정의가 필요하다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 본 연구에서는 경사식 방파제의 파괴조건을 해수면을 기준으로 정의된 처오름의 크기가 제체의 마루높이, F_c 보다 클 때로 정의하였다. 비록 허용월파랑의 개념에 의하면 마루높이 보다 큰 처오름이 반드시 경사식 방파제의 제체 안전성을 위협하지는 않지만, 그에 대한 영향은 고려하지 않기로 가정하였다. 따라서 순수하게 처오름의 크기와 제체의 마루높이만을 비교하여 처오름의 크기가 제체의 마루높이 보다 클때 파괴가 발생한다는 가정하에 신뢰함수를 수립하였다. 이는 본 연구의 목적이 처

오름의 신뢰성 해석에 미치는 파고-주기결합분포의 영향을 정량적으로 해석하는 것이기 때문이다. 따라서 위에서 정의된 파괴모드와 식 (1)을 이용하면 경사식 방파제 전면의 해수면 변동에 따른 불확실성을 고려할 수 있는 다음 식 (2)와 같은 각기 다른 신뢰함수를 쉽게 수립할 수 있다. 특히 아래 식 (2)를 유도하는 과정에 식 (1)에서 정의된 쇄파계수는 심해조건을 이용하여 파형경사 및 주기의 함수로 정의하였다.

$$Z_1 = (h_c - h) - HA_u \left(1 - e^{-B_u \tan \alpha / \sqrt{s_{om}}} \right) \quad (2a)$$

$$Z_2 = (h_c - h) - HA_u \left(1 - e^{-1.25TB_u \tan \alpha / \sqrt{H}} \right) \quad (2b)$$

여기서 h_c 는 해저면을 기준으로 산정한 제체의 높이, h 는 구조물 전면의 수심, 그리고 파형경사, $s_{om} = HL_{om}$ 이다. 구조물 전면의 수심을 하나의 확률변수로 고려한 이유는 앞에서 언급되었듯이 여러 가지 원인에 의하여 발생할 수 있는 수면의 불확실성에 따른 영향을 고려하기 위함이다. 쉽게 알 수 있듯이 식 (2a)는 파형경사로 주기의 영향을 간접적으로 고려할 수 있는 신뢰함수이고, 식 (2b)는 주기를 하나의 확률변수로 고려하여 직접 그 영향을 해석할 수 있는 신뢰함수이다. 이(2003)는 식 (2a)의 개념을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였는데, 이는 주기의 분포함수에 대한 고려가 수학적으로 어렵기 때문이다. Van der Meer(1988, 1995) 등 기존에 신뢰성 해석을 수행한 대부분의 연구자들도 파형경사가 정규분포를 따른다는 가정하에 주기의 영향을 간접적으로 고려하였다. 따라서 주기의 직접적인 영향에 대한 해석이 어려웠다. 그러나 식 (2b)를 이용하면 주기에 따른 영향의 정도를 정확하게 산정할 수 있다. 따라서 식 (2a)를 해석하는 방법보다 식 (2b)를 해석하는 방법이 수학적으로 더 복잡한 과정을 필요로 한다. 식 (2a)에서는 파랑과 관련된 확률변수로는 유

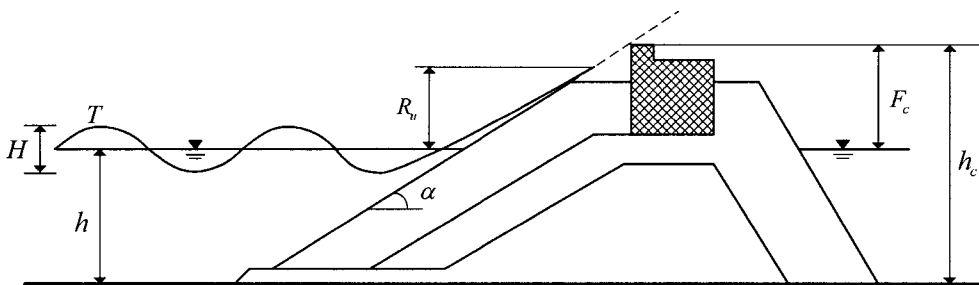


Fig. 1. Definition sketch for run-up analysis.

의 파고와 파형경사에 대한 통계적 특성 및 분포함수만 알면 된다. 즉, 파고의 분포함수는 극치분포를 이용하고, 파형경사는 정규분포를 이용할 수 있었다. 그러나 식 (2b)를 해석하기 위해서는 파고와 주기의 분포함수를 동시에 알아야 한다. 이때 파고와 주기는 두 확률변수가 독립적이지 아니라 결합확률분포를 갖기 때문에 이에 대한 추가적인 해석이 필요하게 된다. 따라서 이하에서 파고의 극치분포와 파고-주기의 결합확률분포에 대하여 서술한다.

3. 파고 및 주기에 대한 확률밀도함수

식 (2)에서 정의된 신뢰함수들을 이용하여 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 신뢰함수를 구성하는 모든 변수들을 확률변수로 고려하여야 한다. 이는 각각의 확률변수에 여러 가지 원인에 의하여 발생하는 불확실성이 필연적으로 내포되기 때문이다. 이(2003)의 연구에 의하면 앞에서 정의된 파괴모드에 가장 큰 영향을 주는 확률변수는 입사파와 관련된 것이었다. 따라서 신뢰성 해석을 수행하기에 앞서 해석에 필요한 파고 및 주기의 분포함수를 정의하는 방법에 대하여 서술하고자 한다.

먼저 파형경사로 정의된 식 (2a)의 신뢰함수를 해석하기 위하여 본 연구에서는 유의파고로 정의되는 다음 식 (3)의 Gumbel 분포가 이용되었다. 이는 식 (2a)에서 정의된 파고의 대표치를 유의파고로 고려한다는 의미이다. 일반적으로 식 (3)은 장기간 파랑관측 자료의 극치분포를 나타낼 때 사용되는 확률밀도함수로, 현행 설계에서는 빈도별 설계파 및 사용연수에 따른 조우확률 산정에 많이 적용되고 있다.

$$f(H_s) = ke^{-k(H_s-\lambda)} e^{-e^{-k(H_s-\lambda)}} \quad (3)$$

여기서 k 와 λ 는 각각 분포함수의 특성을 나타내는 변수로, 유의파고의 통계적 특성에 의하여 결정된다. 따라서 식 (2a)와 식 (3)을 이용하는 신뢰성 해석은 장기간의 유의파고 관측자료를 가지고 그에 해당하는 극치분포함수와 통계적 특성을 이용하여 해당 파괴모드에 대한 파괴확률을 산정하는 것이다. 비록 신뢰함수의 형태가 다르지만 처오름에 대한 신뢰성 해석이 이(2003)에 의하여 수행되었다.

한편 전절에서 언급된 두 가지 조건을 만족하면서 식 (2b)를 해석하기 위하여 필요로 하는 파고-주기결합분포로 Longuet-Higgins(1983)에 의하여 제시된 다음 식 (4)

의 확률밀도함수가 이용되었다. 현재까지 식 (4)는 단일 폭풍사상의 시계열 자료나 스펙트럼으로부터 파고-주기결합분포 특성을 해석하는데 일반적으로 적용되는 유의파고, H_s 와 평균주기, T_z 로 무차원화된 결합확률밀도함수이다.

$$f(r, t) = \frac{2L(v)r^2}{\sqrt{\pi} v t^2} e^{-r^2[1+(1-1/t)^2/v^2]} \quad (4)$$

여기서 $r = H/H_s$, $t = T/T_z$ 로 유의입사파고와 평균주기로 무차원화된 확률변수이고, v 는 파랑 자료의 주파수 폭을 정의하기 위하여 도입된 변수(spectral bandwidth parameter)로, 스펙트럼 해석에서 쉽게 산정할 수 있다. 또한 식 (4)에서 스펙트럼의 폭에 따른 영향을 고려하기 위하여 도입된 함수, $L(v)$ 는 다음 식 (5)와 같이 정의된다.

$$L(v) = \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+v^2}} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

주기의 영향을 직접적으로 고려하기 위하여 유도된 식 (2b)의 신뢰함수를 해석하기 위해서는 먼저 주기에 대한 분포함수의 정의가 필요하다. 또한 주기에 따른 파고의 거동을 잘 나타낼 수 있는 파고분포도 필요하게 된다. 따라서 식 (4)로부터 주기의 분포함수와 주기에 따른 파고의 분포함수를 정의할 수 있는 수학적 과정을 서술하고자 한다. 먼저 식 (4)에 확률변수의 변수변환을 수행한 후, 파고에 대하여 적분하게 되면 주기에 대한 여유확률밀도함수(marginal probability density function)는 다음 식 (6)과 같이 쉽게 정의된다.

$$f(T) = \frac{L(v)}{2vT^2} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{T} \right)^2 / v^2 \right]^{-3/2} / T_z \quad (6)$$

또한 식 (4)와 식 (6)을 이용하면 임의의 대표주기에 대한 파고의 조건확률밀도함수(conditional probability density function)를 다음 식 (7)과 같이 쉽게 정의할 수 있다. 여기서 식 (3)이 주기와는 독립적으로 정의된 파고분포인데 비해 아래 식 (7)은 주기에 따라 파고분포가 다르게 나타날 수 있는 효과를 고려할 수 있다는 중요한 의미를 내포하게 된다.

$$f(H|T) = \frac{4r^2}{\sqrt{\pi}} \left[1 + \left(1 - \frac{1}{T} \right)^2 / v^2 \right]^{-3/2} e^{-r^2[1+(1-1/T)^2/v^2]} / H_s \quad (7)$$

따라서 식 (6)과 식 (7)의 두 분포함수를 이용하게 되면 주기의 영향이 양함수적으로 고려된 식 (2b)의 신뢰함

수에 대한 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 특히 식 (7)을 파괴분포함수로 이용함으로써 주기에 따라 다르게 나타날 수 있는 파괴분포의 특성을 고려할 수 있게 된다. 그러나 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하는 과정은 식 (3)을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하는 과정보다 상대적으로 복잡하다. 이는 Rosenblatt 변환과 같이 정규분포를 따르지 않는 각 확률밀도함수의 정규화하는 절차가 여러 번 필요하기 때문이다.

4. 처오름에 대한 신뢰성 해석

처오름과 관련된 파괴모드의 정의에 따라 신뢰함수가 올바르게 수립되었다. 또한 신뢰성 해석을 수행하는데 필요한 확률변수, 특히 입사파랑과 관련된 확률변수들의 분포함수가 수립되었다. 따라서 각각의 신뢰함수에 대한 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 Level II의 AFDA(Approximate Full Distribution Method)기법을 이용하여 신뢰성 해석이 수행되었다. 특히 AFDA기법은 불변성을 만족하는 해석기법이기에 때문에 동일한 구조물 조건에 대하여 두 신뢰함수로부터 얻게 되는 신뢰성 해석의 결과, 즉, 파괴확률 등을 직접 비교할 수 있다. 또한 정규분포가 아닌 경우에도 해석이 가능하며, 비선형성이 강한 신뢰함수에 대하여도 비교적 정도가 높은 결과를 얻을 수 있다(Thoft-Christensen and Baker, 1982). 본 연구에서 사용한 신뢰성 해석기법과 관련된 자세한 계산 과정은 언급하지 않고, 다만 아래에 Rosenblatt 변환에 의한 유사정규분포(equivalent normal distribution process)를 얻는 과정에 대하여만 간단히 언급하겠다.

유사정규화 과정이란 정규분포를 따르지 않는 확률변수의 분포함수를 정규분포화하는 과정을 말한다. 이 과정은 임의의 분포함수와 정규분포함수를 임의의 설계점에 대하여 비교하여 수행된다. 이와 같은 개념에 의하여 구할 수 있는 유사정규분포의 평균, $\mu^N X_i$ 와 표준편차, $\sigma^N X_i$ 은 다음 식 (8) 및 (9)와 같이 정의된다.

$$\mu^N_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)] \sigma^N_{X_i} \quad (8)$$

$$\sigma^N_{X_i} = \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_{X_i}(x_i^*)\}]}{f_{X_i}(x_i^*)} \sigma_{X_i} \quad (9)$$

따라서 식 (2)의 신뢰함수와 식 (3)-(7)의 분포함수 및 식 (8)과 (9)를 이용하여 경사식 해안구조물의 처오름에

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (2a)

X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
A_u	1.05	0.20	Normal
B_u	-0.67	0.20	Normal
$\tan\alpha$	0.667	0.05	Normal
s_{om}	0.032	0.25	Normal
$H_s(m)$	5.0	0.16	Gumbel
$h(m)$	15.0	0.07	Normal
$h_c(m)$	25.0	-	Deterministic

Table 2. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (2b)

X_i	μ_{X_i}	COV_{X_i}	Distribution
A_u	1.05	0.20	Normal
B_u	-0.67	0.20	Normal
$T_d(\text{sec})$	10.0	-	Marginal
$H_s(m)$	5.0	-	Conditional
$h(m)$	15.0	0.07	Normal
$\tan\alpha$	0.667	0.05	Normal
$h_c(m)$	25.0	-	Deterministic

대한 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 신뢰성 해석은 이미 앞에서 언급된 파괴모드에 대한 파괴확률 및 관련 변수들의 거동특성을 산정하는 것이다. 신뢰성 해석을 위해 사용된 신뢰함수의 각 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수들이 Table 1과 Table 2에 제시되었다. Losada *et al.*(2002)의 해석단면인 경사식 방파제의 기하학적인 특성과 관련된 확률변수의 통계적 특성 및 분포함수는 두 자료가 동일하다. 그러나 파랑특성과 관련하여 Table 1에서는 파형경사를 이용하였으며, 파고에 대하여는 식 (3)에 제시된 바와 같이 주기와는 독립적인 유의파고의 극치분포를 이용하였다. 그러나 Table 2에서는 주기에 대하여는 식 (6)의 주변확률밀도함수를 이용하였으며, 파고에 대하여는 임의의 주기에 대한 식 (7)의 조건확률밀도함수를 사용하였다. 따라서 Table 2의 자료를 이용하게 되면 주기에 따른 영향을 양함수적으로 정량화할 수 있다. 또한 파형경사를 이용하는 비교적 간편한 해석방법과 주기의 분포함수를 직접 고려하는 해석방법간의 결과에 대한 비교 해석도 가능하다.

먼저 식 (2a)와 Table 1의 자료를 이용하여 해석한 결과를 Table 3과 Fig. 2 그리고 Fig. 3에 제시하였다. Table 3의 결과는 설계점(design point)을 찾아가는 반복 계산과정에서 산정된 각 확률변수들의 값이다. 또한 Fig. 2의 결과는 AFDA의 반복계산 과정에 따른 신뢰지수(reliability

Table 3. Random variables at design point evaluated by reliability function, Eq. (2a)

Iteration No.	A_u	B_u	$\tan\alpha$	s_{om}	$H_s(m)$	$h(m)$
0	1.050	-0.670	0.667	0.032	5.000	15.000
1	1.435	-0.725	0.671	0.0299	6.222	16.955
2	1.355	-0.714	0.670	0.0304	6.667	16.637
3	1.311	-0.707	0.669	0.0306	6.957	15.512
4	1.289	-0.704	0.669	0.0307	7.114	16.461
5	1.278	-0.703	0.669	0.0308	7.193	16.439
6	1.273	-0.702	0.669	0.0308	7.231	16.430
7	1.271	-0.702	0.669	0.0308	7.249	16.425
8	1.270	-0.702	0.669	0.0308	7.257	16.423

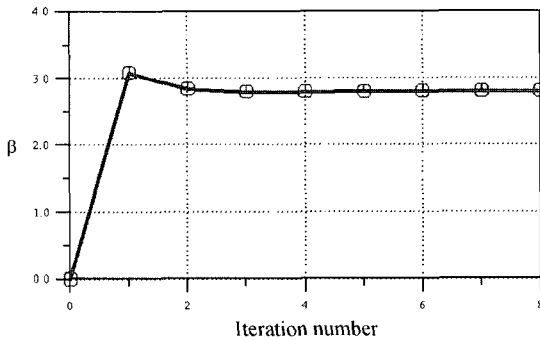


Fig. 2. Variation of reliability index calculated by reliability function, Eq. (2a).

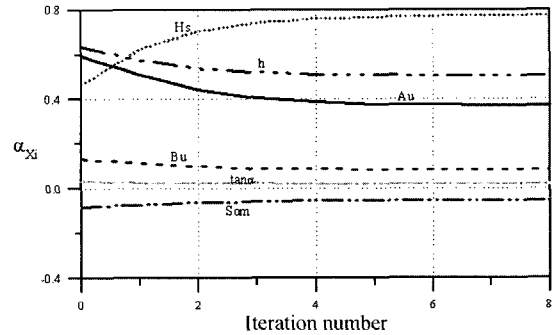


Fig. 3. Variation of influence coefficients calculated by reliability function, Eq. (2a).

index), β 의 거동을 나타낸 것이다. 표나 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 신뢰지수는 반복횟수에 따라 점차 일정한 값으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 각 확률변수들의 영향계수(influence coefficient)의 거동특성을 나타낸 것이다. 여기서 영향계수란 파괴모드에 따른 신뢰지수/파괴확률에 미치는 각 확률변수들의 영향 정도를 나타내는 지표이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 파괴의 영향이 가장 크고, 다음으로 수위의 변화에 따른 영향, 그리고 산정식의 경험계수의 순으로 나타나고 있다. 그러나 경사 및 파형경사의 영향은 아주 작은 것으로 나타나고 있다. 이(2003)의 해석에서도 이와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 한편 식 (2b) 및 Table 2를 이용하여 계산한 결

과를 Table 4 및 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 이때 스펙트럼의 폭에 대한 영향을 고려하기 위하여 정의된로 가정하여 협대역 스펙트럼이라고 생각하였다. 먼저 Fig. 4의 신뢰지수는 전반적인 거동이 Fig. 2와 유사하나 정량적으로 신뢰지수는 1.717로 수렴하고 있다. 이는 파괴확률이 상대적으로 크게 산정되었다는 것을 의미하는 것이다. 또한 Fig. 5의 영향계수의 거동도 유사하게 파고, 수심, 그리고 경험계수의 순으로 나타나고 있다. 다만 Fig. 3의 결과와 비교하게 되면, 주기의 영향은 파형경사를 이용하였을 때와 별 차이를 나타내지 않고 있으나 파고의 영향이 오히려 크게 나타난다는 것이 특이하다. 이에 대한 결과를 자세히 해석하기 위하여 식 (3)과 식 (7)의 분포함

Table 4. Random variables at design point evaluated by reliability function, Eq. (2b)

Iteration No.	A_u	B_u	$\tan\alpha$	s_{om}	$H_s(m)$	$h(m)$
0	1.050	-0.670	0.667	10.000	4.500	15.000
1	1.217	-0.696	0.669	10.345	9.289	15.772
2	1.179	-0.689	0.668	10.267	9.331	15.619
3	1.176	-0.689	0.668	10.252	9.352	15.609
4	1.176	-0.688	0.668	10.251	9.353	15.607

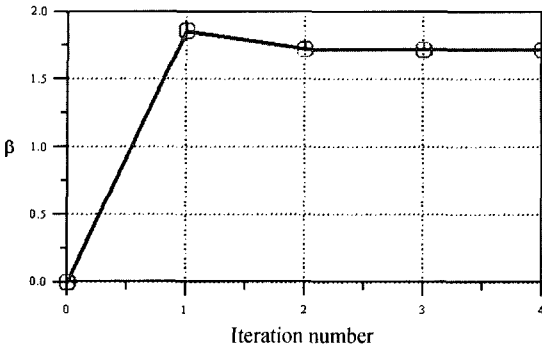


Fig. 4. Variation of reliability index calculated by reliability function, Eq. (2b).

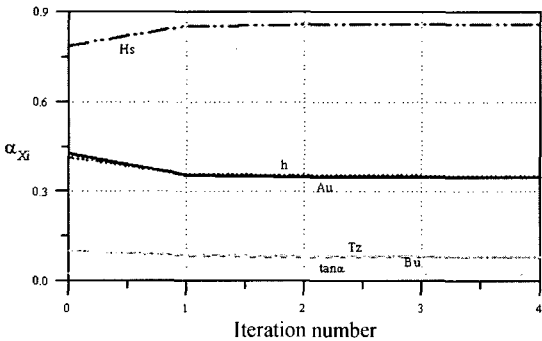


Fig. 5. Variation of influence coefficients calculated by reliability function, Eq. (2b).

수를 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (3)의 Gumbel 분포가 식 (7)의 파고에 대한 조건분포함수보다 평균치를 중심으로 집중되는 현상을 알 수 있다. 이는 당연한 현상이라고 판단된다. 왜냐하면 식 (3)의 Gumbel 분포는 장기간의 관측자료를 가지고 유의파고에 해당하는 극치자료들만의 분포를 정의하는 것이고, 식 (7)의 분포는 단일 폭풍사상의 주기에 따른 파고분포를 정의하는 것이기 때문이다. 따라서 식 (7)의 큰 파고 부근의 꼬리에 해당하는 영향이 파괴확률을 크게 발생시키는 것으로 판단된다. 이는 주기에 따른 영향이 고려된 파고 분포를 이용하는 접근법이 파형경사만을 이용하는 접근법보다는 안전측의 설계를 요구한다는 것을 의미하는 것이다. 그러나 어느 접근법이 실제 설계에 적용되어야 할지는 더 논의되어야 한다. 왜냐하면 실제 설계에서는 빈도 또는 조우확률개념의 설계과가 이용되기 때문이다. 이는 장기간의 파랑 관측자료를 근간으로 하는 것이다. 그러나 단일 하중사상에 대하여는 일반적으로 설계과를 적용하는 것보다는 더 큰 파괴확률을 가지고 치오름이 발생할 수

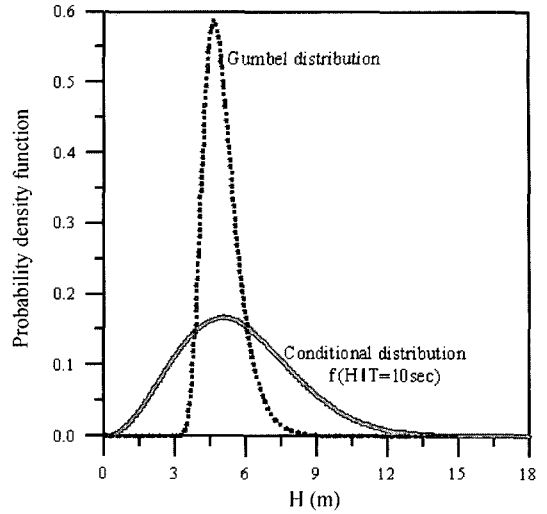


Fig. 6. Comparison of Gumbel distribution with conditional distribution.

있음에 주의해야 한다. 이상의 결과를 종합해 보면 파형 경사와 장기간의 유의파고 자료에 의한 극치분포를 이용하는 식 (2a)에 의한 신뢰성 설계법으로 구조물의 내구년 수 동안의 경사식 방파제의 마루높이 결정이 가능하다고 판단된다. 그러나 상대적으로 중요성이 높은 경사식 방파제의 경우, 유의파고 보다 큰 파고의 영향을 자세히 해석하기 위해서는 단일 폭풍사상에 대한 파고-주기결합확률 분포를 이용하여 추가적으로 치오름을 검토하는 것도 필요하다고 판단된다.

이상에서는 장기간의 유의파고에 대한 극치분포를 이용하는 해석법과 단일 폭풍사상의 파고-주기결합분포를 이용하는 해석법의 신뢰성 해석 결과에 대한 비교가 수행되었다. 또한 극치분포를 이용한 신뢰성 해석법에 대하여는 이미 이(2003)에 의하여 자세한 해석이 수행되었기 때문에, 이하에서는 파고-주기결합분포에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 신뢰성 해석에 대하여 언급하겠다. 먼저 스펙트럼의 주파수 쪽에 대한 영향을 고려하기 위하여 도입된 ν 의 차이에 따른 해석이 수행되었다. 이는 식 (6)에서 알 수 있듯이 ν 의 값에 따라 주기의 확률밀도함수가 다르게 거동할 수 있기 때문이다. 먼저 식 (6)을 이용하여 ν 에 따른 주기의 확률밀도함수를 Fig. 7에 제시하였다. 예상할 수 있었던 것처럼 ν 의 값이 증가함에 따라 밀도함수는 넓은 영역에 걸쳐 존재하게 된다. 또한 신뢰성 해석에서 산정된 신뢰지수의 거동특성을 Table 5 및 Fig. 8에 제시하였다. 그러나 그림에서 쉽게 알 수 있듯

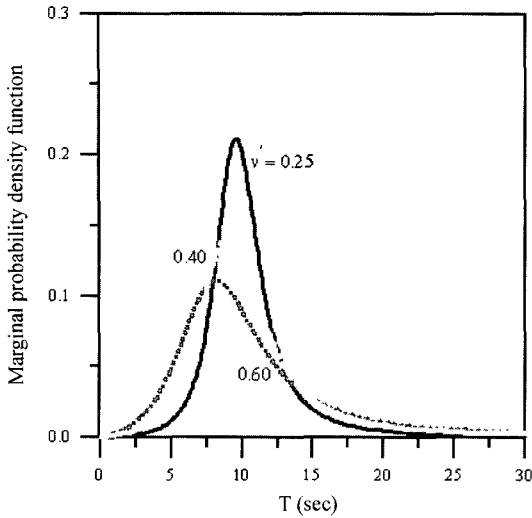


Fig. 7. Marginal probability density function of wave periods for various spectral bandwidth parameter, ν .

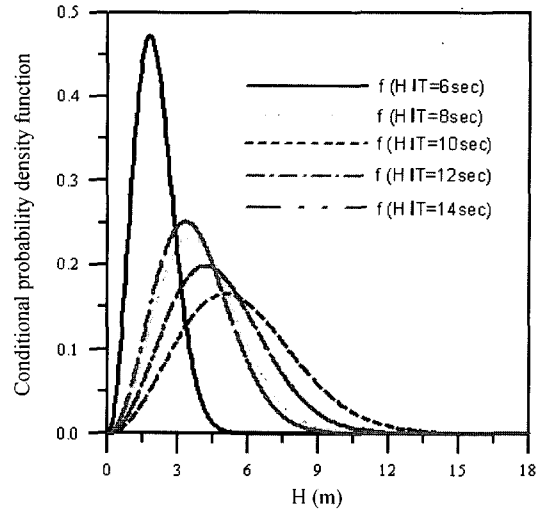


Fig. 9. Conditional probability density function of wave heights for several mean periods, T_z .

Table 5. Reliability index and probability of failure with respect to spectral bandwidth parameter, ν

ν	β	$P_f(\%)$
0.05	1.724	4.235174
0.10	1.723	4.244208
0.20	1.720	4.271404
0.25	1.717	4.298740
0.30	1.714	4.326218
0.40	1.709	4.372329
0.45	1.708	4.381598

Table 6. Reliability index and probability of failure with respect to mean wave period T_z

$T_z(\text{sec})$	β	$P_f(\%)$
6.0	2.483	0.651395
8.0	1.980	2.384984
10.0	1.717	4.298740
12.0	1.561	5.925980
14.0	1.463	7.173189

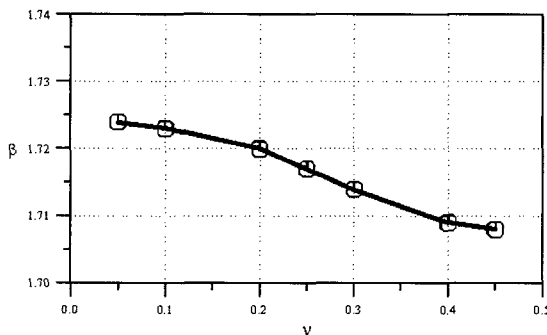


Fig. 8. Variation of reliability index with respect to spectral bandwidth parameter, ν .

의 거동에 따른 영향의 해석도 수행되었다. 신뢰성 해석은 평균주기를 변화시키면서 수행되었다. 먼저 Fig. 9에 $\nu=0.25$ 평균주기에 따른 파고의 조건확률밀도함수를 나타내었다. Longuet-Higgins(1983)에 의하여 언급된 것과 동일한 분포함수를 나타내고 있다. 신뢰성 해석의 결과는 Table 6과 Fig. 10에 제시하였다. 그럼에서 보면 평균주기를 어떻게 정의하느냐에 따라 파고분포의 영역이 달라

이 신뢰지수의 변동은 1% 미만으로 작게 나타나고 있다. 따라서 협대역의 가정이 만족되는 범위내에서 주기에 따른 신뢰성 해석 결과가 크게 달라지지는 않는다. 한편 식 (7)의 평균주기가 주어진 조건에서 파고의 조건확률밀도함수

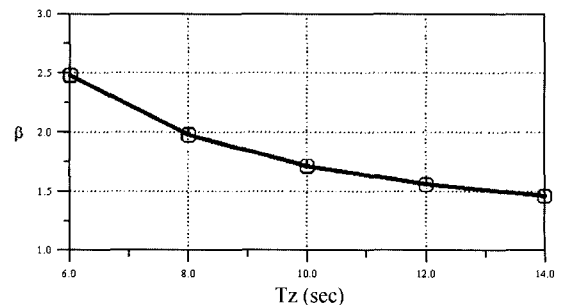


Fig. 10. Variation of reliability index with respect to mean periods, T_z .

Table 7. Reliability index and probability of failure with respect to freeboard F_c

F_c (m)	β	P_f (%)
6.0	0.315	37.638090
8.0	1.038	14.963680
10.0	1.717	4.298740
12.0	2.372	0.884579
14.0	3.037	0.119480

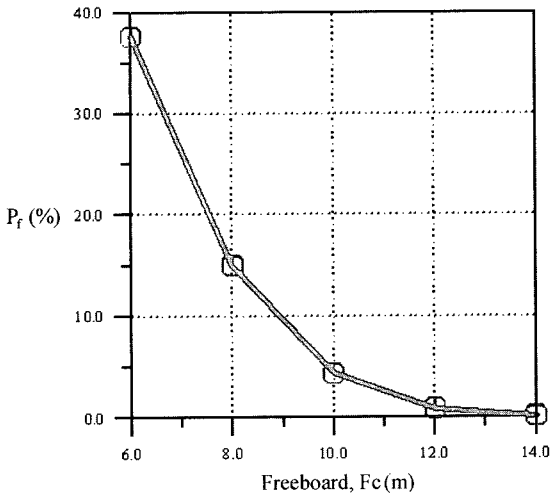


Fig. 11. Probability of failure with respect to freeboard, F_c .

지고, 그에 따라 신뢰지수도 크게 변하는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서 처오름에 대한 신뢰성 해석에서 평균주기에 대한 올바른 설정이 요구된다 할 수 있다. 왜냐하면 파괴 확률에 미치는 주기의 영향은 주로 조건파고분포의 거동을 통하여 반영되기 때문이다. 이상의 결과는 이(2003) 등의 기존의 연구에서 해석할 수 없었다. 마지막으로 Table 2에 주어진 파랑조건을 이용하여 제체의 마루높이 변화에 대한 신뢰성 해석이 수행되어 그 결과를 Table 7과 Fig. 11에 제시하였다 이는 파고-주기결합분포를 이용하여 산정된 신뢰성 해석 결과를 이용하여 경사식 방파제의 마루높이 최적 결정에 도움을 주기 위함이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 제체의 마루높이가 증가함에 따라 파괴확률은 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 11을 이용하면 목표파괴확률에 따른 경사식 방파제의 최적 마루높이를 쉽게 결정할 수 있다. 본 계산 결과를 근거로 목표 파괴확률이 10%인 경우의 최적 마루높이는 약 9 m인데 비해, 5%의 목표파괴확률에 대하여는 약 10 m가 최적 마루높이인 것으로 판단된다. 이와 같은 개념, 즉, 신뢰성설계법은 구조물과 관련된 확률변수가 다른 경우에도 확장

하여 적용할 수 있다. 이는 제체 전체의 최적 설계가 가능하다는 의미이다.

5. 결 론

경사식 방파제에서 파랑과 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 처오름에 대한 파고-주기결합분포의 영향을 해석할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 제시되었다. 제시된 신뢰성 모형은 다음의 두 가지 조건이 만족되도록 하였다. 하나는 신뢰성 해석을 위해 수립되는 신뢰함수에 주기가 하나의 확률변수로 포함되도록 하여, 주기의 통계적 특성과 분포함수가 직접적으로 고려될 수 있다. 다른 하나는 주기에 따라 파고의 분포함수가 약간 다르게 나타나는 현상이 고려될 수 있도록 하였다. 수면의 불확실성에 따른 영향도 해석할 수 있는 신뢰함수를 수립하기 위해 본 연구에서는 Losada(1996)에 의하여 제안된 처오름 산정식을 이용하였다. 또한 주기의 영향을 직접적으로 고려하기 위하여 Longuet-Higgins(1983)의 파고-주기에 대한 결합분포함수가 이용되었다. 한편 장기간 유의파고 자료의 극치분포를 이용하는 이(2003)에 의하여 연구된 파형경사를 이용하는 신뢰성 해석의 결과와도 비교하였다. 이는 결합분포를 이용하는 신뢰성 해석법이 상대적으로 복잡한 과정을 필요로 하기 때문에, 파형경사를 이용하는 보다 실용적인 관점에서의 접근법에 대한 적용성을 알아보기 위함이다.

먼저 유의파고에 대한 극치분포를 이용하는 해석의 결과와 주기-파고결합분포를 이용하는 해석의 결과를 비교하였다. 물리적으로 보면 극치분포는 장기간의 관측자료를 근간으로 해석하는 것이고 파고-주기결합분포는 단일 폭풍사상에 대한 해석을 수행하는 것이다. 해석 결과에 의하면 신뢰지수나 각 확률변수의 영향계수의 거동은 거의 동일하나 결합분포를 이용하는 신뢰성 해석의 결과가 더 큰 파괴확률을 나타내고 있다. 이는 극치분포보다 결합분포가 더 큰 파고에서의 분포특성을 갖기 때문이다. 따라서 처오름과 관련된 파괴모드에 대하여 구조물의 내용년 수 동안의 기능성을 설계할 때는 극치분포를 이용할 수 있으나 단일 폭풍사상의 경우에는 결합분포를 이용하는 추가적인 신뢰성 해석도 필요하다. 한편으로 극치분포에도 주기의 영향을 고려할 수 있는 방법도 모색할 필요성이 있다 하겠다. 또한 파고-주기 결합분포함수에 영향을 주는 변수들의 거동에 따른 해석이 추가적으로 수행되었다. 먼저 스펙트럼의 폭에 따른 영향을 변화시키면서 수

행되었는데 신뢰지수의 변동은 1% 미만으로 아주 작게 나타났다. 그러나 파고분포에 영향을 주는 평균주기를 변화시켜 해석한 결과에서는 신뢰지수의 변동 폭이 크게 나타나고 있다. 따라서 극치분포를 이용하는 해석의 경우에도 평균주기 산정에 상당한 주의가 요구된다. 이와 같은 결과는 파형경사를 이용하는 해석법에서는 얻을 수 없는 결과이다. 마지막으로 제체의 마루높이를 변화시키면서 파괴확률을 산정하였다. 이는 본 연구의 결과를 이용하여 직접 제체의 마루높이를 합리적으로 설계하기 위함이다. 즉, 제체의 마루높이를 변화시키면서 파괴확률을 정량적으로 산정하여 주어진 항만의 중요도나 구조물 배후면의 이용 상황에 따른 목표파괴확률을 이용하면 가장 합리적인 마루높이를 결정할 수 있다. 이와 같은 방법을 경제성 해석과 결부하면 최적의 설계법로 확장할 수 있다. 왜냐하면 마루높이에 따라 제체 전체의 공사비가 달라질 뿐만 아니라 파괴에 따른 여러 가지 직간접적인 비용이 달라지기 때문이다. 이는 구조물이 내용년수 동안 요구되는 총비용을 최소화할 수 있는 마루높이 결정으로 직접 이어지기 때문이다. 이에 대한 연구가 더 수행되어야 한다.

참고문헌

이철웅 (2003). 경사식 해안 구조물에 대한 처오름의 신뢰성 해석. 대한토목학회논문집, 23(6B), 567-574.
 Ahrens, J.P. (1981). Irregular wave runup on smooth slopes. Tech. Aid No. 81-17, Coastal Engrg. Res. Center, Vicksburg, Miss.
 Ahrens, J.P. and Titus, M.F. (1985). Wave run-up formulas for smooth slopes. J. of Waterway, Port, Coast. and Ocn. Engrg., ASCE, III(1), 128-133.
 Bruun, P. (1985). Design and construction of mounds for breakwaters and coastal protection. Elsevier, NewYork.

De Rouck, J., Verdonck, R., Troch, P., Van Damme, L., Schlutter, F. and De Ronde, J. (1999). Wave run-up and overtopping: Prototype versus scale models. MAST III- OPTICREST, A tech. Paper, MAS3-CT97-0116.
 Grune, J. (1982). Wave runup caused by natural storm surge. Proc. 18th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 785-803.
 Longuet-Higgins, F.R.S. (1983). On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field. Proc. R. Soc. Lond. A, 389, 241-258.
 Losada, M.A. (1990). Recent Developments in the Design of Mound Breakwaters. Handbook of Coast. and Ocean Engrg., ed. Herbich, Gulf Publishing, 939-1050.
 Losada, M.A., Grau, J.I. and Baquerizo, A. (2002). The recommendations for maritime and harbor works in Spain. Proc. 28th Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2413-2422.
 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, 221-238.
 SPM(Shore Protection Manual) (1984). Coastal Engineering Research Center. US Army Corps Engineers, Washington, DC.
 Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J. (1982). Structural Reliability Theory and its Applications. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
 Van der Meer, J.W. (1988). Deterministic and probabilistic design of breakwater armour layer. J. of Waterway, Port, Coast. and Ocn. Engrg., ASCE, 114(1), 66-80.
 Van der Meer, J.W. (1995). Conceptual design of rubble mound breakwaters. Advanced in Coast. and Ocn. Engrg., 221-315.
 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), 534-550.

Received February 22, 2005

Accepted August 17, 2005